

**ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ**

*На правах рукописи*

Иванов Евгений Владимирович

**СИСТЕМА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДА В  
НОРМАЛЬНО-ПРОВОДЯЩУЮ ФАЗУ  
СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ УСКОРИТЕЛЬНОГО  
КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН**

Специальность: 01.04.20 – физика пучков  
заряженных частиц и ускорительная техника

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Кандидат физ.-мат. наук

А.О.Сидорин

**Дубна 2013**

## Содержание

<b>ВВЕДЕНИЕ</b>	4
<b>Глава 1. Требования к датчикам перехода, структуре и функциям системы детектирования</b>	
§1.1. Требования, предъявляемые к системе детектирования	8
§1.2. Анализ методов детектирования переходов и структуры систем защиты	11
§1.3. Общие принципы построения системы защиты	18
<b>Нуклотрона</b>	
§1.4. Выводы	23
<b>Глава 2. Система детектирования переходов для Нуклотрона, созданная на период пуско-наладочных работ</b>	25
§2.1. Конструкция датчика перехода	25
§2.2. Структура системы детектирования	31
§2.3. Выводы	32
<b>Глава 3. Конструкция датчиков перехода, созданных для защиты СП элементов системы медленного вывода пучка</b>	34
§3.1. Система медленного вывода Нуклотрона	34
§3.2. Структура системы детектирования переходов в устройствах системы медленного вывода	36
§3.3. Новая реализация датчика перехода	37

§ 3.4. Выводы	38
<b>Глава 4. Модернизированная система детектирования переходов</b>	<b>39</b>
§ 4.1. Принципы построения новой системы	39
§ 4.2. Конструкция датчика перехода	40
§ 4.3. Этапы и результаты ввода в эксплуатацию	42
§ 4.4. Система управления	49
§ 4.5. Выводы	54
<b>Глава 5. Концептуальный проект системы детектирования переходов</b>	<b>56</b>
<b>Бустера NICA</b>	
§ 5.1. Особенности режимов работы СП установок комплекса NICA	56
§ 5.2. Концепция построения системы детектирования	60
§ 5.3. Конструкция универсального датчика перехода	61
§ 5.3. Схема проверки цепей связи и датчика	63
§ 5.3. Подавление помех	65
§ 5.4. Выводы	67
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	<b>68</b>
<b>БЛАГОДАРНОСТИ</b>	<b>70</b>
<b>СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ</b>	<b>71</b>

## Введение

### Актуальность работы

В середине 80-х годов в ОИЯИ была разработана оригинальная конструкция структурных магнитов синхротрона, геометрия поля в которых формируется магнитным сердечником, а возбуждается поле сверхпроводящей (СП) обмоткой. Благодаря существенно меньшим, по сравнению с другими типами СП магнитов, индуктивности и запасенной энергии, такие магниты могут эксплуатироваться при темпе роста поля до 4 Тл/с [1,2]. Первый быстроциклирующий СП синхротрон с магнитами такой конструкции - Нуклотрон - был сооружен в ОИЯИ и введен в эксплуатацию в 1993 г. [3]. Обеспечение надежной эксплуатации магнитной системы в ходе пуско-наладочных работ на Нуклотроне подразумевало создание системы детектирования перехода обмоток магнитов в нормально-проводящую фазу.

В 2000 г. был реализован медленный вывод пучка ионов, ускоренных в Нуклотроне. Это потребовало установки в кольце нескольких дополнительных СП магнитов и создания системы их защиты.

В 2007 г. была начата модернизация ускорительного комплекса Нуклотрон с целью подготовки его к работе в составе инжекционной цепочки тяжелоионного коллайдера ускорительного комплекса NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility), сооружаемого в ОИЯИ [4]. Одной из задач модернизации являлось обновление системы защиты СП магнитов на основе современных технических решений.

В настоящее время ведутся работы по созданию двух СП быстроциклирующих синхротронов – бустерного синхротрона (Бустера) комплекса NICA и синхротрона SIS-100 (проект FAIR – Facility for Antiproton and Ion Research, Дармштадт, Германия [5]). Разработка концепции построения систем детектирования перехода в нормально

проводящую фазу для подобных ускорителей также являлось одной из задач данной работы.

### **Основные цели работы**

Данная работа имела следующие цели:

- создание системы датчиков перехода для ввода в эксплуатацию СП синхротрона Нуклотрон,
- создание датчиков перехода для устройств системы медленного вывода пучка Нуклотрона,
- модернизация систем детектирования перехода в нормально проводящую фазу действующего синхротрона Нуклотрон, для обеспечения надежной работы ускорителя на максимальном проектном поле дипольных магнитов,
- разработка конструкции универсального датчика перехода для ускорительного комплекса NICA.

### **На защиту выносятся:**

1. Конструкция датчиков перехода, структура и результаты эксплуатации системы детектирования переходов, созданной для проведения физического пуска Нуклотрона.
2. Конструкция датчиков перехода, созданных для ввода в эксплуатацию системы медленного вывода пучка Нуклотрона.
3. Технический проект модернизации системы датчиков перехода Нуклотрона и результаты ввода ее в эксплуатацию.
4. Концептуальный проект системы детектирования переходов на вновь создаваемых сверхпроводящих установках ускорительного комплекса NICA. Конструкция и результаты испытания универсального датчика перехода.

## **Научная новизна**

Разработана, создана и успешно эксплуатировалась в течение 20 лет система детектирования перехода в нормально проводящую фазу магнитов первого в мире сверхпроводящего быстроциклирующего синхротрона Нуклотрон.

Разработан проект системы детектирования перехода в нормально проводящую фазу для вновь создаваемых сверхпроводящих установок ускорительно-коллайдерного комплекса NICA.

## **Практическая ценность работы**

Создание и развитие системы детектирования перехода обмоток СП магнитов в нормально-проводящую фазу обеспечило надежную эксплуатацию Нуклотрона для реализации программы физических исследований на внутренней мишени и на выведенных пучках. Модернизация системы обеспечила возможность надежной эксплуатации Нуклотрона на максимальном проектном поле дипольных магнитов. Разработанная конструкция универсального датчика перехода в нормально-проводящую фазу положена в основу системы защиты Бустера проекта NICA. Аналогичные датчики планируется использовать на стенде по тестированию СП магнитов, для устройств канала транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон, для элементов колец коллайдера NICA.

## **Апробация работы**

Основные результаты диссертации докладывались на российских и международных ускорительных конференциях PAC 2001 (Чикаго, США), RuPAC 2012 (СПб), IPAC 2013 (Шанхай, Китай), международном совещании «Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ» (Болгария, Варна, 2001 г.), неоднократно обсуждались на научных семинарах в Объединенном Институте Ядерных

Исследований. Основные результаты диссертации опубликованы в работах [24-35, 38], из них две статьи [34, 38] в журналах, входящих в список рекомендованных ВАК.

### **Структура работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения списка литературы.

В главе 1 приведен обзор методов детектирования переходов, сформулированы основные требования к датчикам перехода, структуре и функциям системы детектирования.

В главе 2 описаны основные схемотехнические и конструктивные решения, принятые при создании системы детектирования переходов для Нуклотрона на период пуско-наладочных работ.

В главе 3 описана конструкция датчиков перехода, созданных для защиты СП элементов системы медленного вывода пучка.

В главе 4 описывается проект модернизации системы детектирования переходов, этапы ее разработки и результаты ввода в эксплуатацию.

В главе 5 приведен концептуальный проект системы детектирования переходов вновь создаваемых ускорительных установок комплекса NICA.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

# **Глава 1. Требования к датчикам перехода, структуре и функциям системы детектирования**

## **§1.1. Требования, предъявляемые к системе детектирования**

Особенностью эксплуатации СП устройств является необходимость защиты их от повреждения в случае спонтанного перехода обмоток в нормально-проводящую фазу. Первоначально СП магниты разрабатывались для получения магнитных полей, заметно превышающих поле насыщения железа, с целью увеличения энергии частиц при том же периметре ускорителя. Безопасность эксплуатации таких устройств обеспечивалась в основном за счет пассивной защиты, основанной на шунтировании обмотки магнита так называемыми «холодными диодами». При этом в случае перехода в нормально-проводящую фазу вся запасенная в магните энергия диссипирует в его обмотке. При эксплуатации синхротронов, когда цепочка из большого количества магнитов питается от одного источника питания, а так же при большой величине запасаемой в магните энергии, необходима так же и активная защита, которая при обнаружении перехода быстро снижает до нуля ток возбуждения магнитов. Активная защита СП магнитов синхротронов основана на системе эвакуации энергии, включающей в себя мощные коммутирующие устройства и резисторы гашения поля. При обнаружении перехода обмотки одного из магнитов в нормально-проводящее состояние источники питания магнитов отключаются (замыкаются выходные цепи, и источник переводится в инверторный режим работы), а коммутирующие устройства вводят в цепь резисторы гашения поля, в которых диссипирует накопленная в магнитах энергия. Кроме того, при низкой скорости распространения активной фазы, для исключения локального перегрева активная защита может включать в себя нагревательные элементы, которые при обнаружении перехода быстро переводят в нормально-проводящую фазу всю



обмотку магнита. В сильноточных ускорителях дополнительной функцией системы детектирования переходов является активация системы аварийного сброса пучка.

Обнаружение нормально проводящей фазы основано на измерении падения напряжения на контролируемом элементе, и выделения из него составляющей, соответствующей активному сопротивлению обмотки.

Напряжение на сверхпроводящем магните в течение цикла магнитного поля можно представить в следующем виде:

$$U(t) = L \frac{di}{dt} + U_{ВП} + U_{ГП} + U_{НПФ} + U_{П}, \quad (1.1)$$

где  $L$  – индуктивность обмотки магнита, в общем случае являющаяся функцией протекающего через обмотку тока  $i$ ,  $U_{ВП}$  – напряжение, вызванное вихревыми токами в магните,  $U_{ГП}$  – напряжение, вызванное перемагничиванием (гистерезисные потери),  $U_{НПФ}$  – напряжение нормально проводящей фазы,  $U_{П}$  – напряжение помех.

Для детектирования переходов на ускорителях применяются два метода: сравнение напряжения на соседних индуктивных элементах и выделение напряжения нормально проводящей фазы в сигнале, измеренном на отдельном контролируемом элементе. В первом методе для сравнения используются либо полуобмотки одного контролируемого элемента (магнита или линзы), либо обмотки соседних идентичных элементов, а в качестве измерительного инструмента используется мостовая схема, на которой выделяется разностное напряжение, возникающее при появлении активного сопротивления в одном из плеч моста. Это напряжение после усиления и обработки и является признаком перехода. Второй метод заключается в измерении одновременно с напряжением и тока, протекающего через магнит, или его производной по времени (например, дополнительной обмоткой, помещенной в магнитный элемент). На основании предварительно измеренных характеристик магнита – индуктивности, как функции тока,

потерь на перемагничивание и гистерезис, микропроцессор вычисляет напряжение нормально-проводящей фазы, и при превышении заданного порогового значения выдает команду на эвакуацию энергии.

Для нормального функционирования системы защиты, независимо от метода детектирования перехода, необходимо эффективное подавление помех. С этой целью, исходя из требований безопасной эксплуатации, устанавливается некоторое пороговое значение напряжения срабатывания защит. При этом датчик выдает сигнал на эвакуацию энергии из системы, в случае, когда длительность превышения порогового значения больше некоторой установленной величины. Конкретные значения порогового напряжения и длительности его превышения определяются индивидуально для каждого типа магнитов на основании исследования скорости развития нормально-проводящей фазы в кабеле, из которого изготовлена обмотка, и условий криостатирования.

В разработке системы детектирования основным моментом является надежность работы датчика перехода. Несрабатывание или отказ датчика могут привести к физическому повреждению контролируемых элементов. При детектировании перехода по мостовой схеме к неработоспособности датчика может привести, например, обрыв провода от средней точки моста. Для обеспечения надежности в каждый датчик встраивается индивидуальная схема тестирования работоспособности, проверяющая цепи защиты и датчик перед началом каждого цикла магнитного поля.

Для повышения надежности работы системы может использоваться дублирование – включение на контроль дополнительно к основным датчикам групповых датчиков, следящих за группами сверхпроводящих элементов.

Неотъемлемой частью системы детектирования переходов является система управления, которая должна обеспечивать оперативный контроль состояния всех

датчиков и предоставлять информацию, необходимую для анализа причин срабатывания защиты.

К моменту создания Нуклотрона имелся опыт эксплуатации системы защиты сверхпроводящего ускорителя TEVATRON [6 - 8] в национальной лаборатории им. Ферми (США). Практически одновременно с Нуклотроном осуществлялся ввод в эксплуатацию сверхпроводящего протонного синхротрона HERA [9,10] (Гамбург, Германия). Проводилась активная разработка систем защит для проекта сверхпроводящего коллайдера в Брукхэйвенской национальной лаборатории (США), первоначально он назывался ISABELLE [11], затем СВА [12] – colliding beam accelerator, а впоследствии получил название RHIC – relativistic heavy ion collider [13,14]) и для Ускорительно-накопительного комплекса [15 - 18] (УНК, СССР, ИФВЭ).

## **§1.2. Анализ методов детектирования переходов и структуры систем защиты**

На ускорителе TEVATRON была применена микропроцессорная система обнаружения нормально-проводящей фазы [6]. Структура системы активной защиты части кольца приведена на Рис. 1.1. При обнаружении перехода система детектирования выдает сигнал на активацию системы нагрева обмоток магнитов (heater trigger), которая замыкает расположенные снаружи криостата накопительные емкости на нагревательные элементы и переводит обмотки всех магнитов, составляющих защищаемую цепочку, в нормально-проводящее состояние. Кроме того, снаружи криостата проложен кабель (bypass bus), который по сигналу системы детектирования (bypass trigger) «закорачивает» защищаемую цепочку. Расположение шунтирующего кабеля снаружи криостата приводит к необходимости размещать сильноточные защитные токовводы на входе и на выходе участка. Это является существенным

недостатком, так как мощные токовводы это достаточно дорогостоящие устройства, и, кроме того, они являются одним из основных источников теплопритока внутри криостатируемого объема.

На входе и выходе защищаемого участка размещены потенциальные выводы (voltage monitor TAP), которые служат для измерения напряжения на цепочке магнитов.

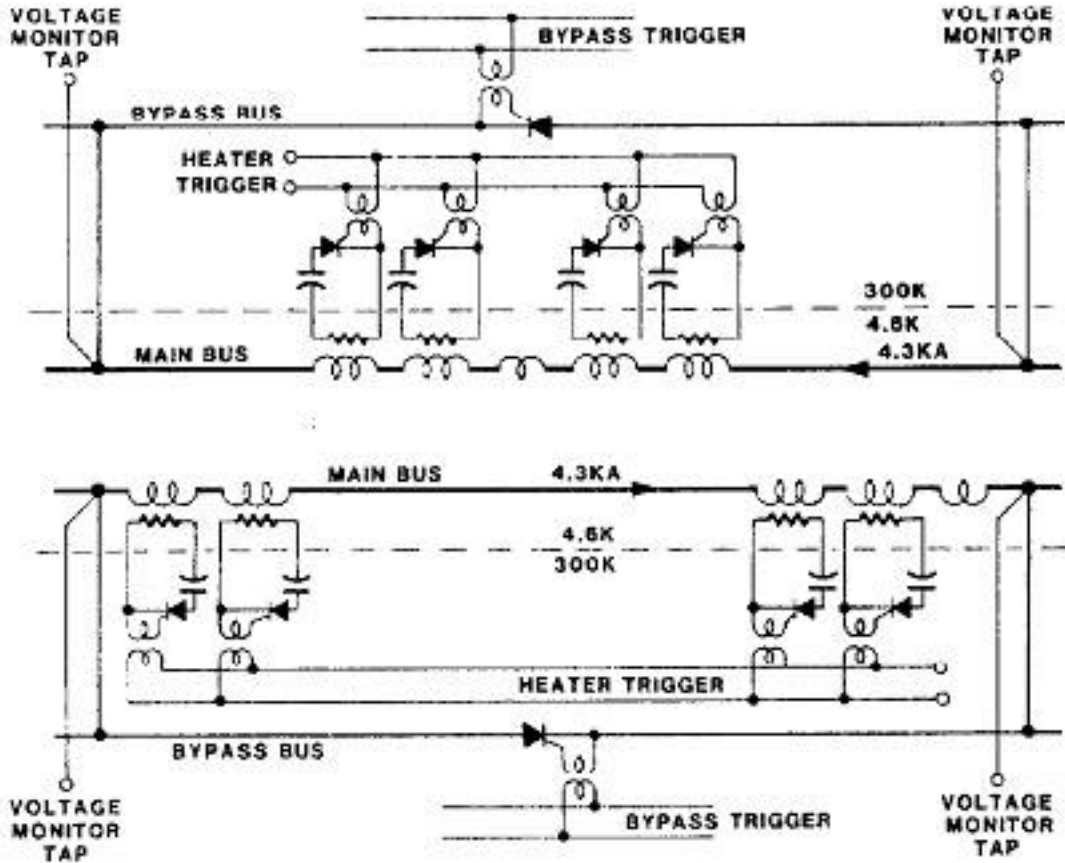


Рис 1.1. Схема системы защиты сверхпроводящих магнитов ускорителя TEVATRON [6].

Детектирование перехода основано на сравнении напряжения, измеряемого на цепочке магнитов, с ожидаемым. Для этого дополнительно измеряется производная тока и в соответствии с формулой (1.1) вычисляется напряжение нормально-проводящей фазы. На примере TEVATRON достаточно наглядно проявляет себя существенная особенность такого метода детектирования. На орбите длиной 6.3 км расположены 774 дипольных и 240 квадрупольных магнитов, соединённых

последовательно электрически. Магнитные элементы помимо индуктивности имеют значительные емкости относительно криостатов, которые заземлены. С точки зрения распространения волн, магнитная система представляет собой линию с волновым сопротивлением, равным 600 Ом, и скоростью распространения волны, равной 25 диполей в миллисекунду. Такое поведение является критичным для детектора перехода, основанного на сравнении напряжения, измеряемого на магните, с ожидаемым, так как  $di/dt$  оказывается различным в различных точках кольца. Чтобы избежать ложных срабатываний защиты и обеспечить надежное детектирование перехода величина  $di/dt$  измеряется в шести точках кольца, и в контролируемой ячейке ее значение комбинируется из сигналов, взятых по обе стороны от этой ячейки.

Производительность процессоров, имевшихся на момент создания TEVATRON, позволяла обрабатывать все сигналы с помощью одного процессора. Однако, из-за большого периметра кольца, однопроцессорная система была отвергнута на стадии проектирования из-за непомерной стоимости соединительных кабелей. Из экономических соображений, а так же для оптимизации обслуживания криогенной системы и других нужд ускорителя была создана сеть из 24 процессоров MC68000 (в то время самый мощный из встраиваемых процессоров) с 16-битной архитектурой и хорошей работой в режиме реального времени. В первую очередь, каждый процессор автономно защищает свою собственную секцию кольца, кроме того, мониторы слабо связаны друг с другом в режиме реального времени.

Опыт 30-летней эксплуатации ускорителя TEVATRON подтвердил надежность выбранной схемы детектирования переходов, но, с другой стороны, выявил и ее недостатки, не последним из которых является ее высокая стоимость. Кроме того, ее практическое применение ограничено случаем относительно невысокого темпа роста поля (в TEVATRON максимальная производная тока составляла 300 А/с).

Заметного снижения стоимости системы детектирования и защиты удалось достигнуть при разработке электрон (позитрон) – протонного коллайдера HERA, включающего в себя СП протонный синхротрон на энергию 820 ГэВ [9]. По его периметру, равному 6,336 км, располагаются 416 горизонтально и 6 вертикально отклоняющих диполей, 224 квадрупольей и множество корректирующих магнитов, все они являются сверхпроводящими. Несмотря на существенно больший периметр, по структуре системы электропитания этот синхротрон является ближайшим аналогом Нуклотрона (Рис. 1.2).

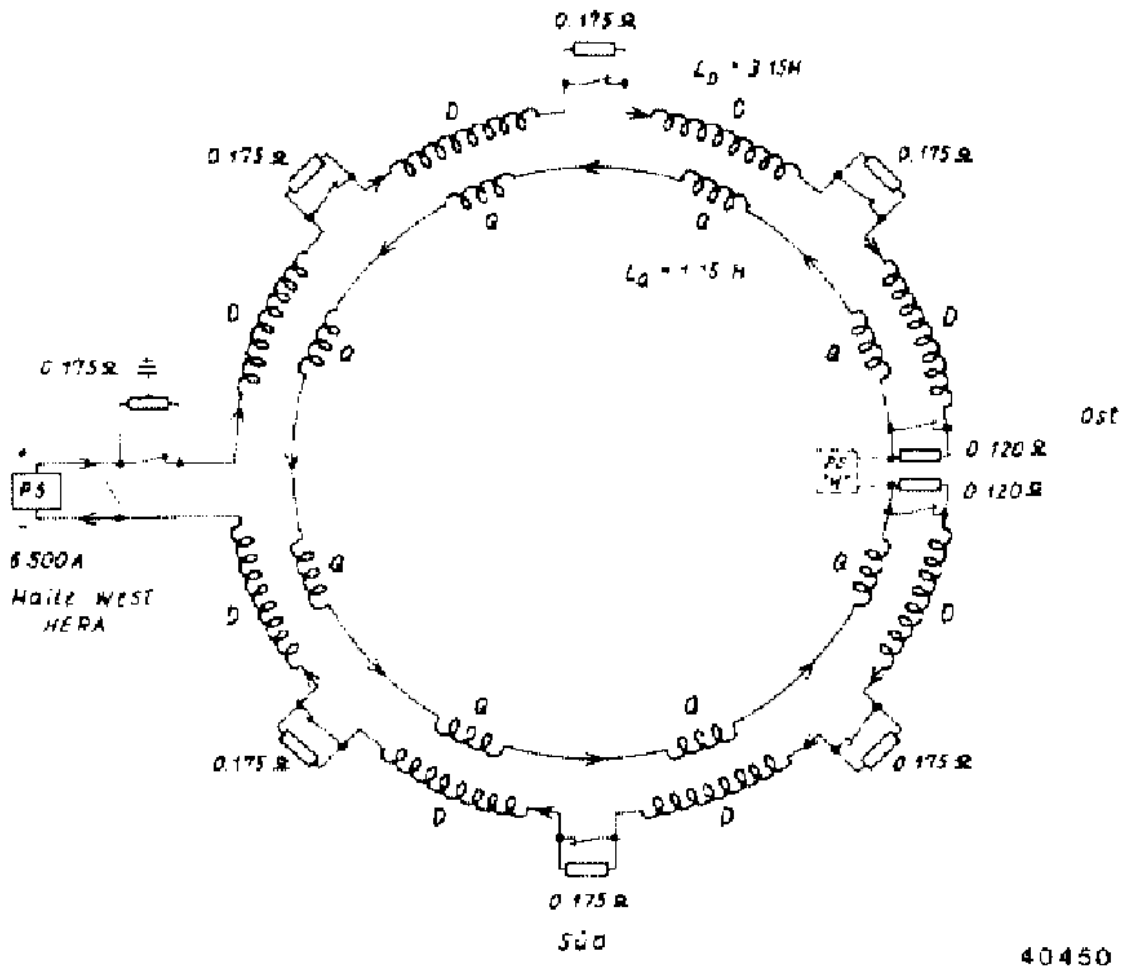


Рис 1.2. Схема электропитания магнитной структуры синхротрона HERA [9].

Вся цепь магнитов, питаемых последовательно, разбита на участки с примерно равной индуктивностью, между которыми располагаются коммутаторы системы эвакуации энергии и резисторы гашения поля. При нормальной работе схемы

коммутаторы замкнуты, и ток течет через них. При обнаружении перехода коммутаторы размыкаются и, таким путем, в цепь вводятся подключенные параллельно с ними резисторы. Количество и сопротивление резисторов выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, обеспечить быстрое снижение тока (постоянная времени эвакуации энергии в HERA 18 мс), а, с другой стороны, не вызвать слишком большого перепада напряжения на магнитах.

Для пассивной защиты элементов кольца HERA используются «холодные диоды», которые располагаются внутри криостатов. Они автоматически открываются при повышении напряжения на элементах и шунтируют обмотку. При этом нет необходимости в дополнительных сильноточных токовводах в криостат. Применение диодов обеспечивает безопасность эксплуатации магнитов, однако, система детектирования необходима, чтобы активировать систему эвакуации энергии и, в случае необходимости, включить нагреватели в магнитах.

В отличие от TEVATRON детектирование перехода основано на применении мостовой схемы (Рис. 1.3), в которой плечами моста являются половины обмоток магнитов. Для реализации такой схемы все сверхпроводящие магниты на HERA имеют потенциальный выход со средней точки. В случае возникновения перехода сопротивления полуобмоток становятся различными, ток начинает течь через середину моста. Такая схема может не обнаружить перехода, если он возникнет точно в центре магнита и будет с одинаковой скоростью распространяться в обе стороны от этой точки (так называемый «симметричный переход»). Несмотря на то, что такой абсолютно симметричный переход ни разу не наблюдался за все время эксплуатации магнитной системы HERA, для его обнаружения используется резервирование - четыре соседние магнита объединяются в супермост.

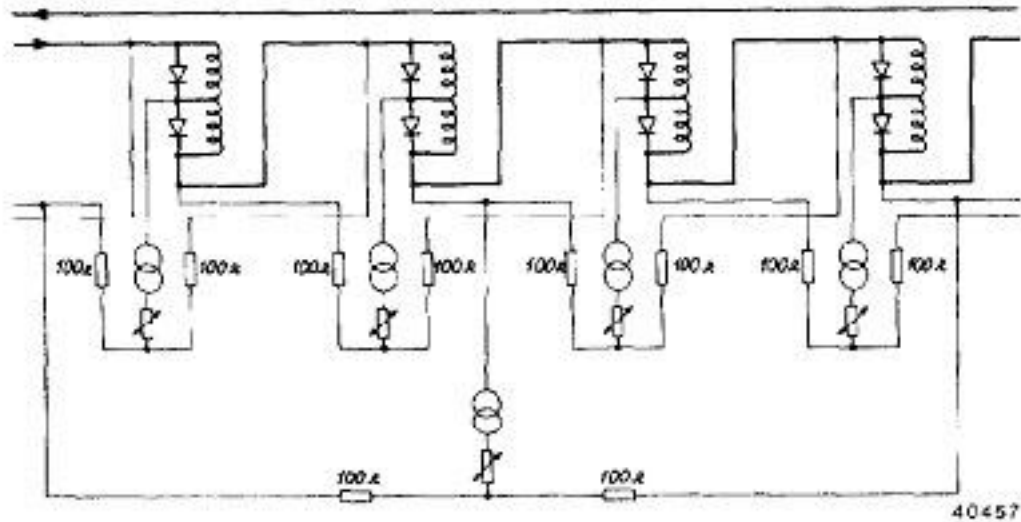


Рис. 1.3. Схема детектирования переходов ускорителя HERA [9].

В качестве измерительного элемента используется магнитный усилитель. Это устройство усиливает контролируемое напряжение (для HERA порог срабатывания датчика был установлен равным 100 мВ) до уровня 10 В. Магнитные усилители нечувствительны к радиации, поэтому могут располагаться непосредственно на кольце, а высокий уровень выходного напряжения может легко передаваться на удаленные электронные блоки для анализа. Основной функцией, выполняемой магнитными усилителями, является гальваническая изоляция датчика от общих земляных цепей. Это необходимо, так как при срабатывании защит в процессе эвакуации энергии потенциал отдельных элементов может достигать значений порядка кВ по отношению к потенциалу земли. Однако, магнитный усилитель, как устройство, сложен в изготовлении и настройке, требует индивидуальной калибровки каждого экземпляра, имеет малый диапазон передаваемого сигнала как по частоте, так и по амплитуде. Возможно, именно эти недостатки побудили разработчиков системы детектирования TEVATRON отказаться от мостовой схемы, так как в то время альтернативы магнитному усилителю практически не было: отсутствовали, или были очень дороги,



оптопары с высоким пробивным напряжением и, тем более, аналоговые изолированные усилители.

Сигналы с выхода магнитных усилителей передаются на электронные микропроцессорные блоки, которые принимают решение об эвакуации энергии и включении нагревателей, если это необходимо, а также тестируют работоспособность системы.

Идеология построения системы защиты, разработанная и опробованная для УНК, была призвана совместить преимущества двух выше описанных систем [17]. Ее испытания проводились на тестовой цепочке из 4-х магнитов М1 – М4 (Рис 1.4). Ток возбуждения от источника PS подавался в криостат через мощные токовводы PL1, PL2. В центре криостата размещалась еще одна пара сильноточных токовводов – защитные токовводы SL1, SL2, которые использовались для шунтирования магнитов с помощью кабельных линий, расположенных снаружи криостата. Кроме того, на обмотках магнитных элементов располагались нагреватели.

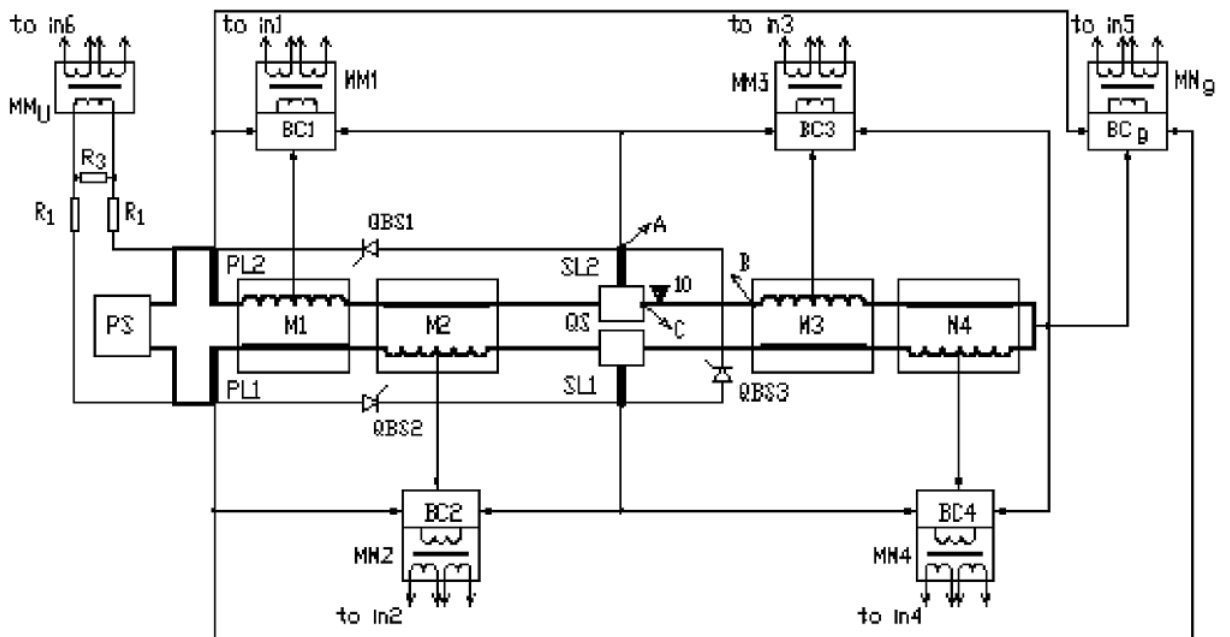


Рис 1.4. Схема электропитания и защиты цепочки из 4-х магнитов УНК [17].

Основой системы детектирования являлся датчик перехода с мостовой схемой (BC) и магнитными усилителями (MM). Измерительные мосты MM1-MM4 сравнивают напряжения на полуобмотках каждого из магнитов M1-M4. Имеется также один групповой датчик MMg для контроля всей группы магнитов и один датчик MMu, контролирующей падение напряжения на линейном участке шины питания. Сигналы с датчиков передаются на систему управления, которая включает исполнительные устройства и вырабатывает сигналы управления магнитными усилителями.

Система эвакуации энергии включает защитные ключи для эвакуации тока (QBS), нагреватели магнитных элементов и защитные шины для выводимого тока.

Когда появляется переход в одном из магнитов, например в M2, по сигналу датчика перехода система управления запускает нагреватели в магнитах M1 и M2, их обмотки шунтируются внешним кабелем с помощью тиристоров QBS1 и QBS2, а источник питания переводится в инверторный режим. В результате ток в магнитах M1 и M2 быстро падает за счет диссипации энергии в их обмотках, тогда как ток в M3 и M4 падает с нормальной скоростью через SL1, SL2, QBS1 и QBS2.

В конце 80-х, начале 90-х годов интенсивные испытания датчиков перехода и систем защит проводились так же для будущего коллайдера RHIC [13,14] и Сверхпроводящего суперколлайдера (США). Накопленный опыт схемотехнических решений послужил основой для разработки структуры систем защиты и детектирования переходов для Нуклотрона.

### **§1.3. Общие принципы построения системы защиты Нуклотрона**

Задачи, решаемые при проектировании магнитной системы Нуклотрона, существенно отличались от задач, решаемых на других сверхпроводящих ускорителях. В первую очередь, максимальная величина магнитного поля была выбрана на уровне 2 Тл,

что позволило использовать магнитное ярмо для формирования требуемого качества поля [19]. Основная задача – обеспечение рекордно высокой для СП магнитов частоты повторения циклов ускорения (темп роста поля в магнитах Нуклотрона может достигать 4 Тл/с) – была решена за счет разработки трубчатого кабеля, использующего в качестве хладагента двухфазный гелий [20]. При этом индуктивность обмотки и, как следствие, запасаемая в магните энергия, оказывается существенно меньше, чем в магнитах типа «cos $\theta$ », в которых геометрия поля формируется витками обмотки. В качестве наиболее разительного примера можно привести сравнение с магнитной системой LHC (Large Hadron Collider, Швейцария, ЦЕРН [21-23]). Один дипольный магнит LHC при номинальном токе, запасает примерно 9.3 МДж, тогда как полная запасенная энергия во всех 100 дипольных магнитах Нуклотрона составляет менее 2 МДж.

Особенности конструкции и режимов эксплуатации магнитной системы Нуклотрона в большей степени и определили структуру и технические решения, положенные в основу его системы защиты. Во-первых, из-за малой запасенной энергии, шунтирование магнитов в случае возникновения нормально-проводящей фазы внешними кабелями является излишним. Во вторых высокий темп изменения тока ( $di/dt$  до 12 кА/с) практически исключает возможность детектирования переходов с помощью микропроцессорного метода: напряжение нормально-проводящей фазы составляет менее 1% от индуктивного падения напряжения на магните. Поэтому за основу системы защиты Нуклотрона была выбрана схема, при которой запасенная энергия диссипирует в резисторах гашения поля, располагаемых снаружи криостата, а детектирование нормально-проводящей фазы осуществляется с помощью измерительного моста.

Уравнение, описывающее зависимость тока от времени в процессе эвакуации энергии, имеет вид:

$$L \frac{di}{dt} + i(R_{внеш} + R_{дин}(t)) = 0 \quad (1.2)$$

Здесь  $L$  – суммарная индуктивность цепочки СП магнитов,  $R_{внеш}$  – суммарное сопротивление резисторов гашения поля,  $R_{дин}$  – динамическое сопротивление участка СП кабеля, перешедшего в нормально-проводящее состояние. Величина  $R_{внеш}$  в основном определяет постоянную времени экспоненциального спада тока и долю запасенной энергии, диссипирующей в обмотке магнита. Для предотвращения перегрева кабеля в месте появления нормально-проводящей фазы величину  $R_{внеш}$  нужно выбирать достаточно большой. С другой стороны, максимальная величина напряжения на цепочке магнитов в момент начала эвакуации энергии равна  $R_{внеш} i$ , и, чтобы избежать перенапряжения, цепочку приходится разбивать на сектора, что приводит к увеличению количества мощных тоководов. Для выбора оптимального значения  $R_{внеш}$  были исследована зависимость температуры разогрева СП кабеля в районе нормальной зоны от величины напряжения на магните в начальный момент эвакуации энергии. Исследования проводились на одиночном магните и на штатном дипольном магните Нуклотрона при испытаниях октанта магнитной системы ускорителя в цепи, состоящей из 12 диполей и 4 квадруполей, соединенных последовательно [19]. Нормальная зона в исследуемом магните создавалась с помощью импульса нагревателя, а по осциллограммам напряжений с потенциальных концов, расположенных по обе стороны от нее, форме тока и индуктивной составляющей напряжения на магните определялись скорость распространения нормальной фазы и температура нагрева кабеля.

Так при напряжении на магните в начале эвакуации энергии, равном 38.8 В максимальная температура кабеля на нормально-проводящем участке достигала 170 К, при 28.8 В – 285 К, при 23.2 В – 450 К. Скорость распространения нормально-проводящей фазы в зависимости от тока в обмотке изменялось от 10 до 20 м/с, так что принудительный перевод всей обмотки в нормально-проводящее состояние не является

необходимым (несмотря на это некоторые магниты Нуклотрона снабжены нагревательными элементами, которые используются при проверке системы защиты).

По результатам исследований было решено, что напряжение на одном магните в момент начала эвакуации тока бкА должно быть не менее 40 В. (Это соответствует постоянной времени спада тока примерно 170 мс.) Соответственно на всей цепи дипольных магнитов перепад напряжения достигает 4 кВ. Чтобы избежать перенапряжений, дипольные магниты было решено разбить на 4 одинаковые группы с суммарной индуктивностью примерно 25 мГн каждая (Рис. 1.5). При нормальной работе с началом цикла работы ускорителя через замкнутые коммутаторы К1-5 течет ток возбуждения магнитов от главной системы формирования магнитного цикла ускорителя ИП.

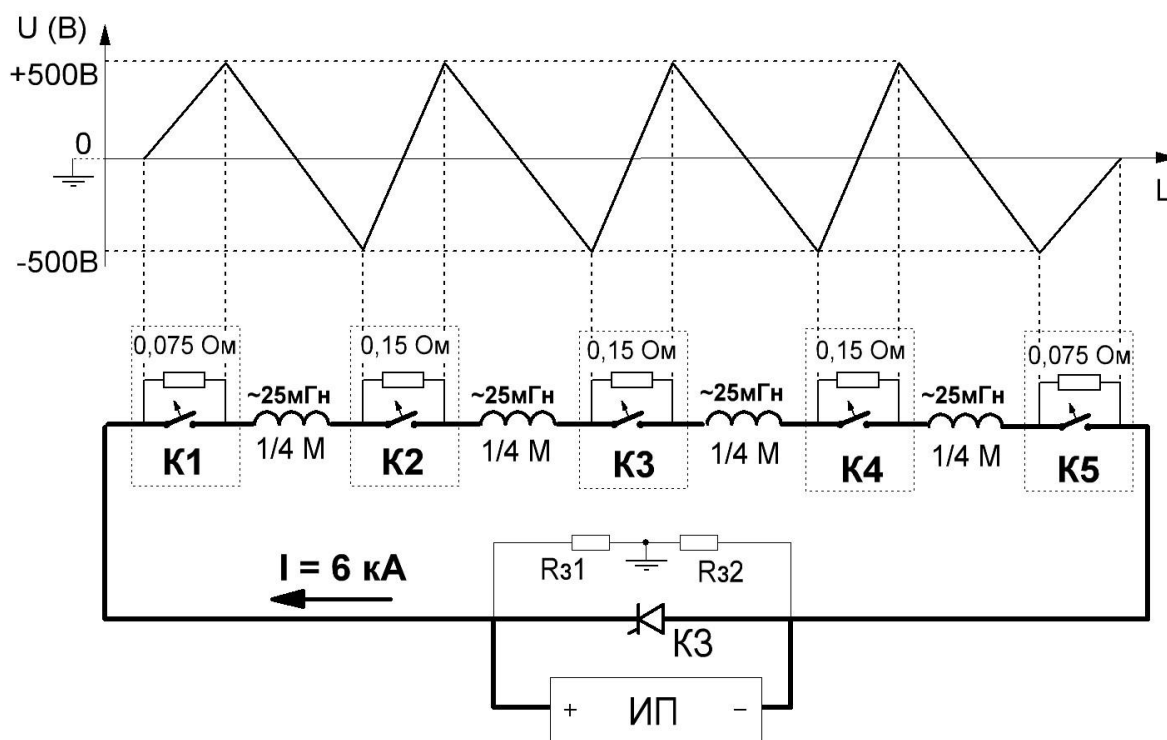


Рисунок 1.5. Схема эвакуации энергии из дипольных магнитов Нуклотрона и диаграмма распределения потенциалов по цепи магнитов [20].

При эвакуации энергии по команде от датчиков перехода включается короткозамыкатель источника питания КЗ и размыкаются К1-5. Ток магнитов М коммутируется из цепей коммутаторов в цепи сопротивления гашения поля включенные параллельно к ним. Начинается аварийная эвакуация энергии с экспоненциальным спадом тока с постоянной времени, определяемой отношением индуктивности магнитов к сопротивлению гашения поля. Потенциал ИП относительно «земли» симметрируется резисторами R31,2. При этом, при токе эвакуации энергии 6 кА, потенциалы различных участков цепи магнитов относительно «земли» не превышают  $\pm 500$  В.

Ток питания каждой группы дипольных магнитов вводится в криостат силовыми токовводами. Все квадрупольные линзы (ввиду существенно меньшей полной индуктивности - суммарная запасенная энергия в линзах примерно в четыре раза меньше, чем в магнитах) достаточно разбить на 2 группы. Из конструктивных соображений удобнее объединить в группу все линзы (и фокусирующие и дефокусирующие) каждого из полуколец Нуклотрона. При этом, для питания всех соединенных последовательно линз каждого из двух полуколец, используется две пары силовых токовводов. Ток разбаланса между фокусирующими и дефокусирующими линзами, необходимый для настройки рабочей точки ускорителя, на максимальном поле не превышает 200 А и вводится в криостат через менее мощные токовводы. Таким образом, для безопасной эксплуатации магнитной системы Нуклотрона минимально необходимо иметь пять пар силовых токовводов в криостат, а с учетом технологического разделения по системе криогенного охлаждения кольца на две части, шесть пар мощных токовводов, что и было реализовано в проекте.

В ходе исследований магнитов определялись также и зависимости температуры разогрева кабеля при эвакуации энергии от порогового напряжения срабатывания

датчика перехода и длительность его превышения. В качестве компромисса между помехозащищенностью и надежностью работы защит были сформулированы следующие требования: при сравнении двух соседних магнитов пороговое значение разницы напряжения на них принято равным 60 мВ, а время его превышения 1 - 5 мс. Для повышения надежности работы системы было решено использовать дублирование. Для групповых датчиков (сравнивающих напряжения на группах из нескольких идентичных магнитов) пороговое напряжение может быть увеличено до 100 мВ.

#### **§ 1.4. Выводы**

На основе имевшегося мирового опыта и с учетом особенностей конструкции магнитов Нуклотрона за основу построения системы эвакуации энергии было принято схемотехническое решение, основанное на установке балластного резистора снаружи криостата совместно с коммутирующим устройством, замыкающим цепь группы магнитов на этот резистор в случае срыва сверхпроводимости.

За основу системы детектирования перехода была принята мостовая схема. Критерием наличия перехода является одновременное превышение порога по амплитуде напряжения  $V_{th}$  и по длительности -  $T_v$  (validation time). Плечами моста, где это возможно, являются обмотки соседних идентичных магнитов. Для повышения надежности работы системы было решено использовать дублирование.

По результатам испытаний, проведенных на одиночном магните и при испытаниях октанта магнитной системы, была определена структура системы эвакуации и сформулированы основные требования к датчикам перехода.

- Конструкция датчиков должна обеспечивать, гальваническую изоляцию датчиков как от общих земляных цепей, так и друг от друга. При этом система детектирования не должна вносить паразитные утечки в электрические цепи ускорителя. При токе эвакуации энергии 6 кА, потенциалы различных участков цепи магнитов относительно

«земли» могут достигать  $\pm 500$  В. Изоляция датчика должна надежно выдерживать удвоенное значение, что необходимо при нештатной работе одного из ключей эвакуации энергии.

- Порог срабатывания датчика, контролирующего соседние магниты, составляет  $V_{th} \geq 60$  мВ, время превышения порога  $T_v$ , являющееся признаком перехода, варьируется в интервале 1 - 5 мс.

- Для групповых датчиков пороговое напряжение составляет 100 мВ.

Система управления датчиками перехода должна обеспечивать следующий минимальный набор функций:

- индикация перехода и формирование сигнала активации системы эвакуации энергии,

- оперативный контроль состояния всех датчиков и формирование сигнала на запрет цикла в случае обнаружения неисправности.



## **Глава 2. Система детектирования переходов для Нуклотрона, созданная на период пуско-наладочных работ**

Успешное испытание суперпериода магнитной системы Нуклотрона, проведенное в феврале 1990 года, подтвердило правильность концепции построения системы защиты и обеспечило необходимые данные для проектирования и изготовления системы детектирования переходов в нормально-проводящую фазу. Первоначально система детектирования перехода для Нуклотрона создавалась как полнофункциональный прототип, предназначенный для проведения пусконаладочных работ, который, затем, после нескольких модификаций эксплуатировался вплоть до ноября 2012 года, когда система была полностью заменена на новую.

### **§ 2.1. Конструкция датчика перехода**

Датчик перехода в нормально-проводящую фазу, используемый на Нуклотроне, основан на мостовой схеме, выбор которой определялся на основе анализа режима работы магнитов, а также надежностью и простотой технической реализации. Достоинство этого метода заключается в том, что мост является пассивным элементом и может сравнивать сигналы в большом динамическом диапазоне практически от 0 В до максимального напряжения на магнитных элементах. Из недостатков следует отметить то, что мост может быть сбалансирован точно только на одной частоте (в реальной работе на постоянном токе) и, следовательно, может иметь паразитный разбаланс на частотах помех и при резких изменениях напряжения источника питания.

Плечами моста являются индуктивности обмоток двух соседних идентичных магнитов (или цепочек магнитов), и резистор, располагаемый снаружи криостата, которым и осуществляется балансировка моста (Рис. 2.1). При возникновении

нормально-проводящей фазы в обмотке одного из магнитов в диагонали моста возникает разностное напряжение разбаланса, которое и фиксируется датчиком.

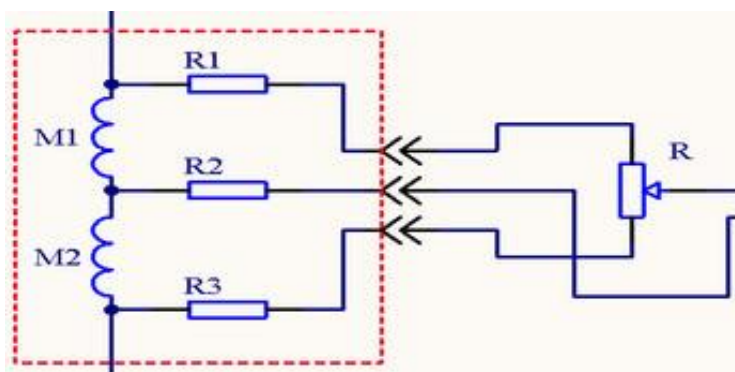


Рис 1.2. Мостовая схема сравнения напряжений: M1 и M2 – обмотки соседних идентичных магнитов, R1 – R3 – защитные резисторы, R – балансирующий резистор. Пунктирной линией обведены элементы, расположенные внутри криостата.

Для гальванической развязки сигналов с измерительной части моста в начальных разработках предлагалось использовать магнитный усилитель, по аналогии с конструкцией датчиков ускорителей HERA и УНК. Однако, необходимость индивидуальной калибровки каждого экземпляра существенно затрудняла серийное производство таких устройств. Кроме того, в условиях работающего ускорителя есть опасность наводок на магнитный усилитель от магнитного и ВЧ полей. Поэтому на начальном этапе разработки системы детектирования основные усилия были направлены на поиск альтернативы магнитному усилителю.

После последовательных испытаний нескольких прототипов на стенде по тестированию магнитов и экспериментальном суперпериоде магнито-криостатной системы была принята оригинальная структурная схема датчика, приведенная на Рис. 2.2.

На изолированной от потенциала земли части располагается источник питания, усилитель, вход которого защищен ограничителем амплитуды, препятствующим также

и уширению коротких импульсов большой амплитуды после интегрирования, и амплитудный компаратор.

Сигнал с компаратора является дискретным и несет информацию о превышении амплитудного порога срабатывания датчика и длительности этого превышения. Этот сигнал гальванически отделен от остальной (заземленной) части схемы. Реализация усиления сигнала и его обработки на изолированной части позволила отказаться от применения магнитных усилителей, а гальваническую развязку реализовать путем применения цифровых оптопар. Это решение потребовало разработки источника питания для устройств, расположенных на изолированной части схемы.

На заземленной части схемы датчика измеряется длительность сигнала о превышении амплитудного порога и при превышении временного порога (1-5 мс) формируется выходной сигнал. Выбор уставок амплитудного и временного компараторов позволяет отстроиться от ложных срабатываний и надежно фиксировать момент перехода в нормально-проводящую фазу.

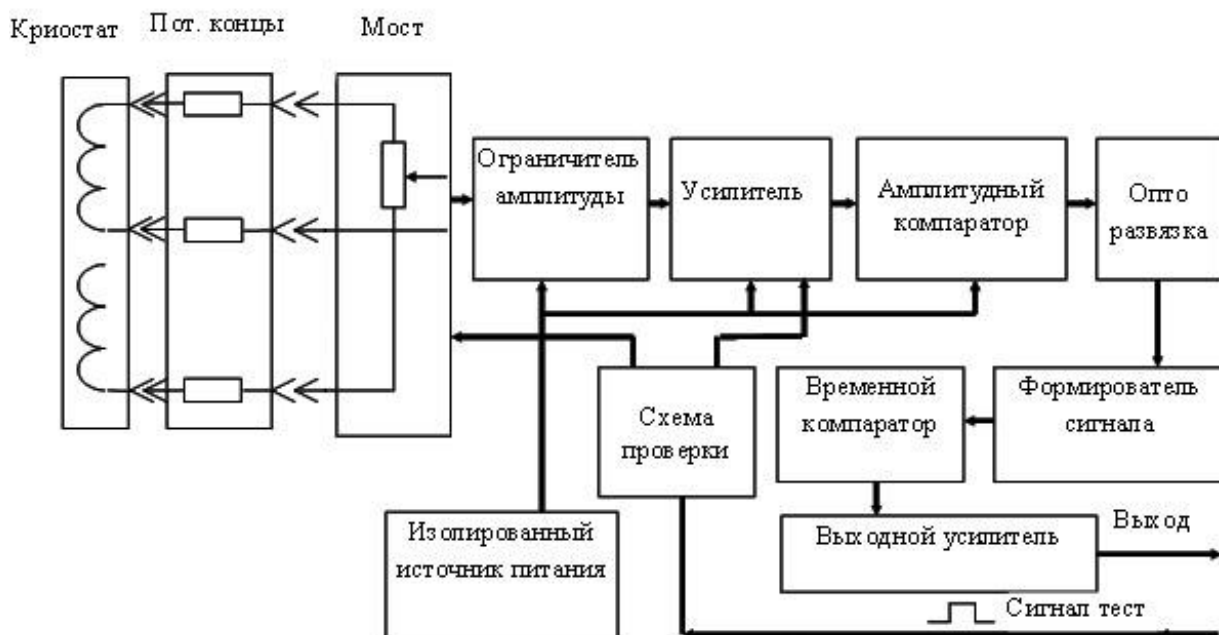


Рис. 2.2. Блок схема первой реализации датчика перехода.

Для проверки работоспособности датчика перед подачей цикла магнитного поля, в его состав была введена схема проверки. Схема состоит из следующих элементов (рис. 2.3): M1 и M2 – магнитные элементы ускорителя совместно с Rbal составляют измерительный мост. В измерительную цепь моста включен трансформатор T1, состоящий из трех обмоток I, II, III. Заряженный от источника питания конденсатор C и обмотка III составляют колебательный контур. При подаче сигнала Test на тиристор VD1 в цепи C-VD1/VD2-T1/III формируется один период синусоиды тестового напряжения. Этот сигнал, проходя через линии связи и элементы измерительного моста, поступает на вход датчика перехода, который и контролирует его наличие. В случае отсутствия сигнала на выходе датчик формирует сигнал на запрет цикла.

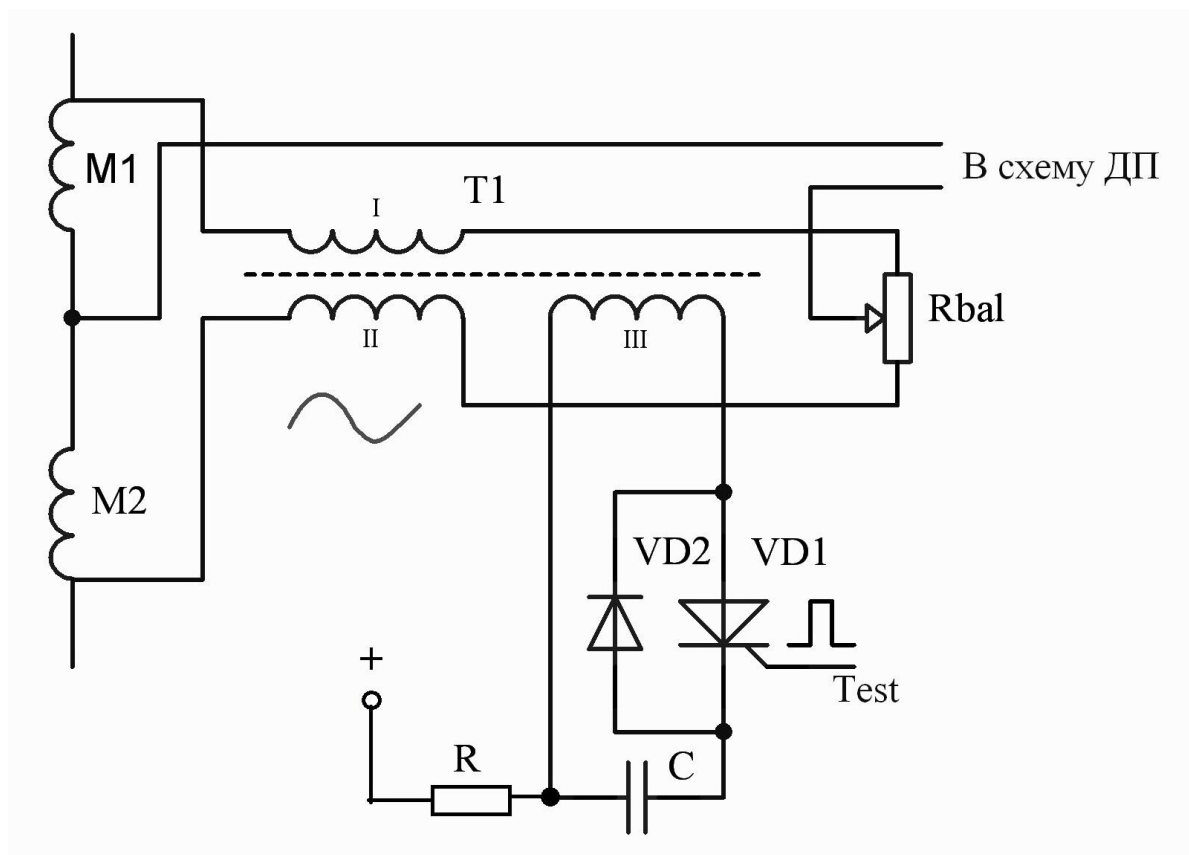


Рис. 2.3. Схема проверки датчика перехода (ДП).

В электронной схеме датчика были применены микросхемы стандартной логики серии 155 и 555, интегральный таймер (155АГ3), операционные усилители общего назначения (К140УД7), а так же 2-х канальный оптрон, состоящий из пар светодиод-фотодиод (промышленных доступных оптопар на напряжение 1000 В тогда просто не было). В качестве изолированного источника питания был разработан собственный генератор с самовозбуждением на ферритовом трансформаторе (кольце).

В качестве иллюстрации на Рис. 2.4 приведен фрагмент принципиальной электрической схемы датчика с обозначением основных функциональных узлов.

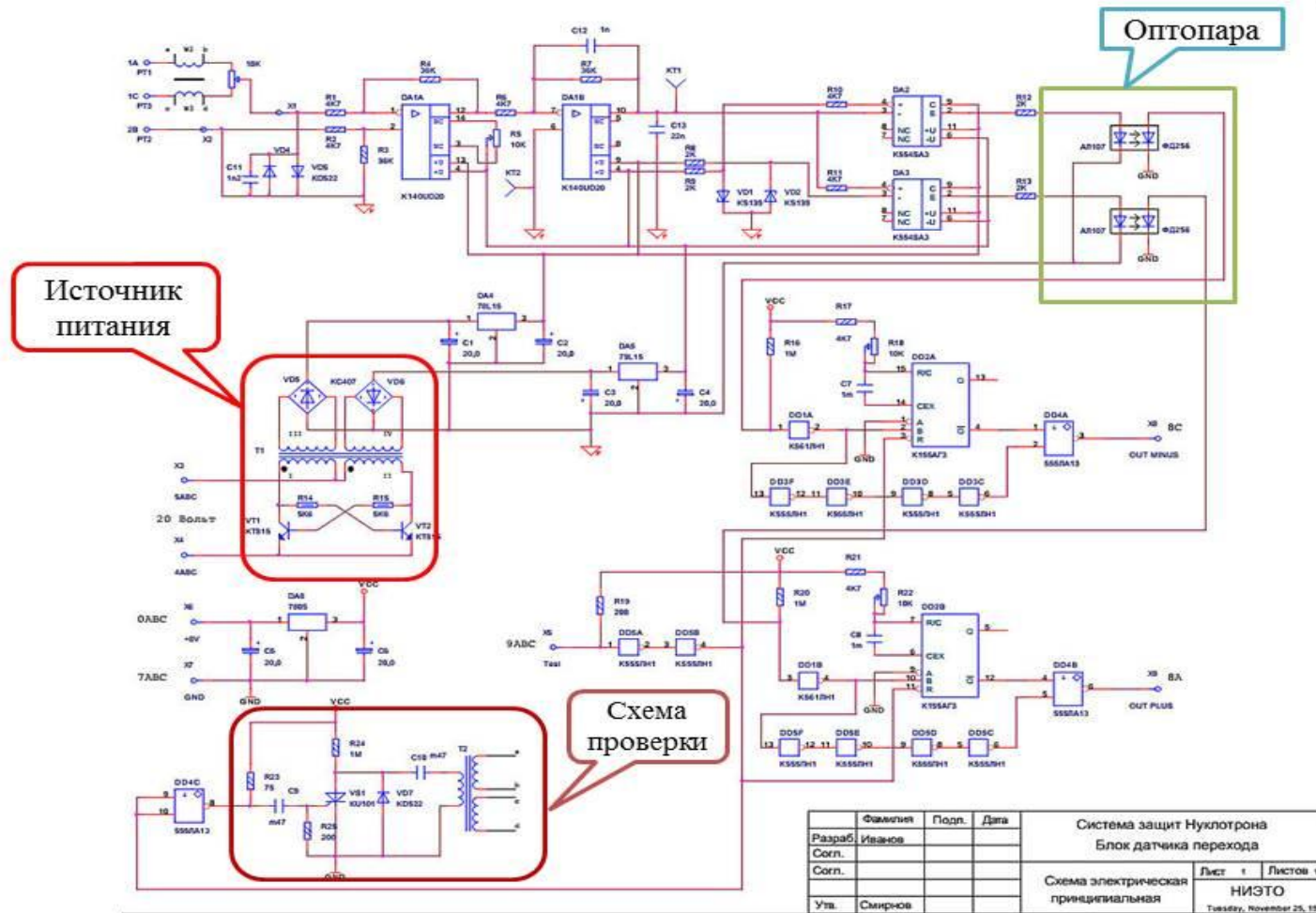


Рис. 2.4. Фрагмент схемы датчика перехода.

## § 2.2. Структура системы детектирования

Магнитно-криостатная система ускорительного комплекса ЛФВЭ состоит из кольца Нуклотрона и измерительного суперпериода [20]. Измерительный суперпериод включает в себя 4 дипольных и 4 квадрупольных (2 фокусирующих и два дефокусирующих) магнита. В кольце Нуклотрона размещены 96 структурных дипольных магнитов, 64 структурных квадрупольных магнита, инфлекторный магнит системы инжекции, несколько десятков дипольных, секступольных и октупольных корректирующих магнитов. Корректирующие магниты питаются индивидуально от источников малой мощности, конструкция которых обеспечивает их защиту в случае перехода обмотки в нормально-проводящую фазу. Для основной части магнитов, соединенных последовательно и питаемых от одного мощного источника, плечами измерительного моста в датчике перехода являются индуктивности обмоток двух соседних идентичных магнитов (дипольных или квадрупольных). Для инфлекторного магнита системы инжекции, не имеющего пары, плечами измерительного моста являются половины его обмотки, для чего используется потенциальный вывод с ее средней точки. Для реализации резервирования магнитная система Нуклотрона была разбита на 16 групп магнитов и 8 групп линз, которые контролировались групповыми датчиками.

Всего к началу первого сеанса работы Нуклотрона (март 1993 г.) было изготовлено и протестировано около 200 датчиков. Датчики были собраны на элементной базе в доминирующем в то время конструктиве «Вишня» (Рис. 2.5).

Созданная к началу первого сеанса система управления обладала лишь минимально необходимым набором функций. В них входили контроль за возникновением активной фазы, формирование сигнала для включения защит и сигнала запрета цикла при неисправности. Вся индикация была на светодиодах.

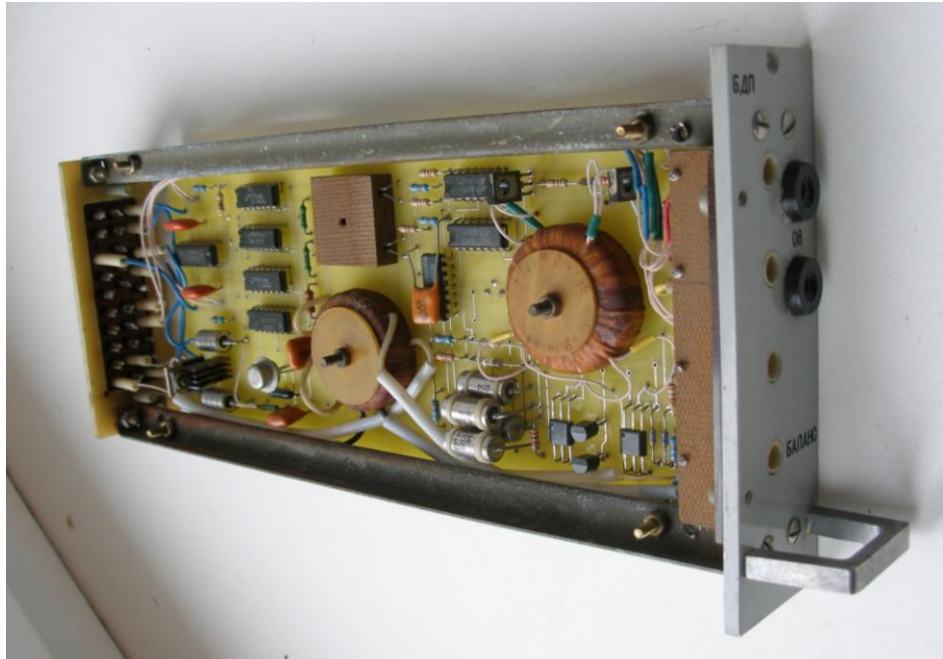


Рис. 2.5. Первый полнофункциональный датчик перехода.

Немного позднее схема управления была доработана, для реализации возможности передачи сигналов о срабатывании на ЭВМ. Для этого были разработаны модули для работы на шине ISA IBM PC на основе ПЛИС ALTERA серии 7000S. Эти модули принимали информацию от датчиков перехода и передавали в компьютер. Информация о сработавшем элементе, времени срабатывания и т.п. записывалась в специальный файл, который можно было просматривать удаленно. Визуальный контроль формы сигнала с датчика производился с помощью осциллографа.

Система, созданная на период пуска Нуклотрона и проведения первых сеансов, удовлетворяла требованиям надежности, и обеспечила безаварийную эксплуатацию ускорителя в течение почти 20 лет.

### § 2.3. Выводы

К моменту проведения пуско-наладочных работ на Нуклотроне были выполнены следующие работы:



- разработана конструкция датчика перехода, полностью удовлетворяющая требованиям надежности, изготовлено и протестировано более 200 датчиков;
- разработана структура системы детектирования, для повышения надежности использующая резервирование;
- создана система управления датчиками перехода, обеспечивающая выполнение минимально-необходимого набора функций.

В отличие от имевшихся аналогов, в датчике, разработанном для Нуклотрона, амплитудный компаратор размещен на изолированной части схемы, временной компаратор – на заземленной, а гальваническая развязка выполнена на основе цифровой оптопары.

Созданная и введенная в эксплуатацию система обеспечила надежную безаварийную работу ускорителя в течение почти 20 лет.

## **Глава 3. Конструкция датчиков перехода, созданных для защиты СП элементов системы медленного вывода пучка**

### **§ 3.1. Система медленного вывода Нуклотрона**

В течение первых шести лет эксплуатации Нуклотрона эксперименты по программе физических исследований проводились на циркулирующем пучке с использованием внутренних мишеней. В 1999 г. для реализации медленного вывода пучка в направлении существующего экспериментального корпуса в кольце Нуклотрона были установлены дополнительные сверхпроводящие устройства: два магнита Ламбертсона, 4 квадрупольных и 4 секступольных магнита [24].

Медленный вывод из Нуклотрона осуществляется за счет раскачки горизонтальных колебаний частиц путем возбуждения нелинейного резонанса. При проектном положении рабочей точки ускорителя резонанс достигается при смещении частоты горизонтальных колебаний к значению  $Q_x=20/3$ . Для возбуждения резонанса используются две пары секступольных магнитов для получения 20-й гармоники квадратичной нелинейности поля. Первая пара расположена на 2-м и 6-м октантах и вторая пара на 4-м и 8-м октантах. Линзы каждой пары соединены последовательно и расположены в противоположных точках кольца и питаются от отдельных источников. Четыре дополнительных квадрупольных магнита, питаемых последовательно, используются для смещения рабочей точки в область резонанса и управления процессом вывода. Эти магниты, расположенные в 1-м, 2-м, 5-м и 7-м октантах, по конструкции аналогичны структурным квадрупольным магнитам, но имеют несколько меньшую длину. Темп вывода частиц, определяющий длительность вывода пучка, управляется темпом изменения тока  $di/dt$  в этих линзах.

Выводимая часть пучка отделяется и отклоняется системой вывода, расположенной в 5-й прямолинейной секции (Рис. 3.1). Первое устройство в ней - электростатический

септум (ESS), работающий при напряжении до 200 кВ, он расположен в первой половине секции. Септум, электрическое поле которого отклоняет часть циркулирующего пучка с орбиты, сделан из вольфрамо-рениевых проволочек толщиной 0,1 мм. Пучок в зазоре отклоняется наружу от орбиты в горизонтальной плоскости на угол 2 мрад для уменьшения потерь на железном септуме магнита Ламбертсона (LM), расположенном во второй половине прямолинейной секции.

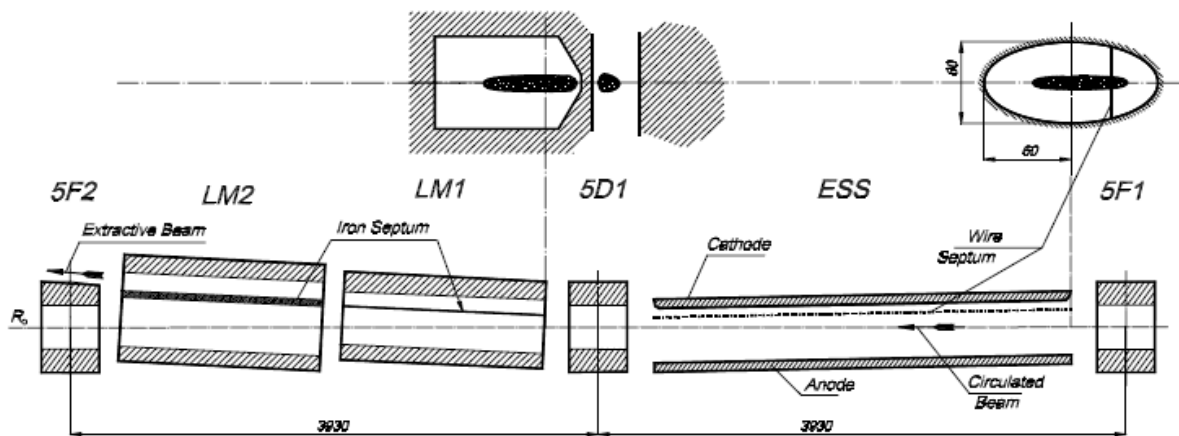


Рис. 3.1. Расположение устройств медленного вывода и положение пучка в них [24].

Магнит Ламбертсона, состоящий из двух 1,5 м секций, отклоняет выводимый пучок в вертикальной плоскости на угол 96 мрад и направляет его по каналу транспортировки в экспериментальные павильоны, расположенные на уровне медианной плоскости Синхрофазотрона. Сверхпроводящие обмотки обеих секций магнита Ламбертсона соединены последовательно с обмотками обычных диполей. Это позволяет обеспечивать постоянный угол отклонения при выводе независимо от энергии пучка.

На основе результатов моделирования процесса медленного вывода было определено оптимальное радиальное положение электростатического септума и магнитов Ламбертсона, которое соответствовало смещению ножа на 19 мм внутрь рабочей апертуры (полная апертура в этом месте равна  $\pm 55$  мм). Поэтому для обеспечения оптимальных условий при инжекции и ускорении частиц в области 5-й прямолинейной секции необходимо иметь горизонтальное смещение орбиты пучка в начале цикла

магнитного поля. Для введения управляемого искажения орбиты было решено использовать четыре структурных дипольных магнита.

### **§ 3.2. Структура системы детектирования переходов в устройствах системы медленного вывода**

Секступольные магниты системы медленного вывода, предназначенные для возбуждения нелинейного резонанса, питаются от источников малой мощности, конструкция которых обеспечивает их защиту в случае перехода обмотки в нормально-проводящую фазу.

Остальные устройства системы медленного вывода (квадрупольные магниты и магниты Ламбертсона) было необходимо включить в существующую систему детектирования переходов. Кроме того, 4 дипольных магнита, расположенных в окрестности системы медленного вывода используются для создания управляемого искажения («бампа») орбиты для обхода циркулирующим пучком ножа электростатического септума. При этом каждый из этих дипольных магнитов должен быть запитан от отдельного управляемого источника, соответствующая ранее схема с включением двух соседних магнитов в измерительный мост требовала модификации.

Для квадрупольных магнитов системы медленного вывода и для дипольных магнитов «бампа» орбиты была принята схема детектирования, аналогичная инфлекторному магниту системы инжекции, - плечами измерительного моста являются половины обмоток, для чего используется потенциальный вывод со средней точки обмотки. Магниты Ламбертсона, питаемые последовательно со структурными дипольными магнитами первоначально составляли два плеча одного измерительного моста, а затем были включены по схеме со средней точкой, потому что их параметры значительно отличаются.

### § 3.3. Новая реализация датчика перехода

При вводе в эксплуатацию системы медленного вывода пучка, была разработана новая реализация датчика перехода, основанная на той же структурной схеме (Рис 2.2), но выполненная с применением более современной элементной базы (Рис. 3.2) [25]. В частности для оптоизоляции были применены промышленные транзисторные оптроны (128 серии), применены более новые аналоговые элементы, цифровые микросхемы новых серий. Гальваноразвязанный источник питания стал более компактным, хотя и остался самодельным. В качестве балансирующего элемента моста был использован многооборотный прецизионный резистор- Helipot. Конструктивно датчик был выполнен в компактном корпусе и монтировался непосредственно на контролируемом элементе.



Рис . 3.2. Датчик перехода для устройств медленного вывода.

Прототип датчика был испытан на структурных элементах магнитной системы Нуклотрона. После необходимой доработки была изготовлена и протестирована партия из 15 новых датчиков (с учетом резервирования). К началу 2001 года датчики были установлены на кольце Нуклотрона и включены в существующую систему детектирования переходов.

Первые эксперименты на выведенном пучке из Нуклотрона были выполнены в 2000 и в марте 2001 г. Были получены коэффициент вывода около 70% и время вывода

0.4 сек в экспериментах, выполненных на дейтронном пучке с энергией от 200 МэВ/н до 1.5 ГэВ/н. Затем были выполнены эксперименты по облучению на внешних мишенях пучками ионов углерода  $C^{+6}$  и магния  $Mg^{+12}$ . В последующих сеансах длительность растяжки выведенного пучка была доведена до 10 с, а эффективность вывода до 95%. Созданные датчики перехода обеспечили надежную работу устройств медленного вывода, вплоть до ввода в эксплуатацию новой системы детектирования.

### **§ 3.4. Выводы**

В 2001 году на Нуклотроне была введена в эксплуатацию система медленного вывода пучка. Для ее реализации в кольце Нуклотрона были установлены дополнительные сверхпроводящие устройства: два магнита Ламбертсона, 4 квадрупольных и 4 секступольных магнита. Кроме того была изменена схема питания 4-х дипольных магнитов, расположенных в окрестности медленного вывода.

Для защиты новых СП устройств структура системы детектирования переходов была доработана, разработана и испытана новая конструкция датчика перехода, основанная на той же структурной схеме, но выполненная с применением более современной элементной базы. Конструктивно датчик был выполнен в компактном корпусе и монтировался непосредственно на контролируемом элементе.

Созданная и введенная в эксплуатацию система обеспечила надежную безаварийную работу устройств системы медленного вывода.

## **Глава 4. Модернизированная система детектирования переходов**

### **§ 4.1. Принципы построения новой системы**

В 2007 г. была начата модернизация ускорительного комплекса Нуклотрон с целью подготовки его к работе в составе инжекционной цепочки тяжелоионного коллайдера ускорительного комплекса NICA, сооружаемого в ОИЯИ. Одной из задач модернизации являлось обновление системы защиты СП магнитов на основе современных технических решений. Система, существовавшая с момента ввода ускорителя в эксплуатацию, за время длительной работы устарела и морально и физически, элементы гальванической развязки стали деградировать. В последние годы ее эксплуатации участились выходы из строя электронных элементов схемы, возможно, из-за накопленного воздействия радиоактивного излучения. Кроме того, в качестве одного из ее недостатков можно отметить отсутствие элементов интерактивного удаленного контроля и управления.

Новая система детектирования переходов, основанная на современных технических и конструктивных решениях, была разработана и создана в ходе модернизации ускорительного комплекса Нуклотрон. Она была спроектирована на основе использования микроконтроллерного управления. Это позволило все датчики объединить по управлению и передаче информации на основе последовательных интерфейсов: все датчики подключаются к одной двухпроводной линии, по которой производится обмен информацией. Это решение позволяет при необходимости удаленно оперативно менять количество действующих датчиков, управлять режимом их работы, устанавливать индивидуальные пороги срабатывания, записывать в память датчика контролируемый сигнал для дальнейшей визуализации и анализа. В систему также введен контроль текущего состояния всех узлов, контроль сигналов воздействия на внешние устройства и индикация неисправностей.

## § 4.2. Конструкция датчика перехода

Создание новой системы потребовало полной переработки конструкции датчика, необходимой для возможности обмена данными по последовательному каналу. Кроме того измерительный мост был вынесен из датчика, что позволяет производить его замену без повторной балансировки. Изолированная и заземленная части в новом датчике связаны между собой посредством изолирующего аналогового усилителя.

Датчик перехода состоит из следующих узлов (Рис. 4.1):

На изолированной части:

- Мостовой балансирующий резистор  $R_{bal}$
- Ограничитель уровня входного сигнала
- Предварительный масштабирующий усилитель с функцией интегрирования
- Аналоговый изолирующий усилитель

На заземленной части:

- Аналоговый изолирующий усилитель
- Амплитудный компаратор
- Аналоговый ключ
- Микропроцессор
- Драйверы шин
- Изолированный DC/DC преобразователь
- Источники питания собственных нужд.

Сигнал с мостовой схемы усиливается усилителем – интегратором. Интегрирование уменьшает действие коротких импульсов помех. Для уменьшения расширения коротких импульсов большой амплитуды интегратором на входе усилителя применен ограничитель амплитуды, который также защищает вход усилителя от перегрузок. Далее усиленный сигнал передается на заземлённую часть датчика через аналоговый изолирующий усилитель. Поскольку обрабатывается только разностный



сигнал амплитудой 0-100 мВ можно использовать достаточно дешевый изолирующий усилитель с небольшим динамическим диапазоном входного сигнала.

Полученный сигнал разбаланса подается на вход амплитудного компаратора и на вход АЦП микроконтроллера. Этот же сигнал через аналоговый ключ может быть подключен к аналоговой шине для передачи на удаленный АЦП для визуального наблюдения. Сигнал разбаланса анализируется микроконтроллером и, в случае превышения его амплитуды и времени действия заданных пороговых величин, вырабатывается сигнал на включение системы эвакуации энергии. АЦП микроконтроллера записывает оцифрованный сигнал во внутреннюю память для дальнейшего его анализа и визуализации при необходимости. Микроконтроллер связывает устройство (ДП) с внешними блоками и ЭВМ по шине CAN, по которой обменивается информацией и управляющими сигналами.

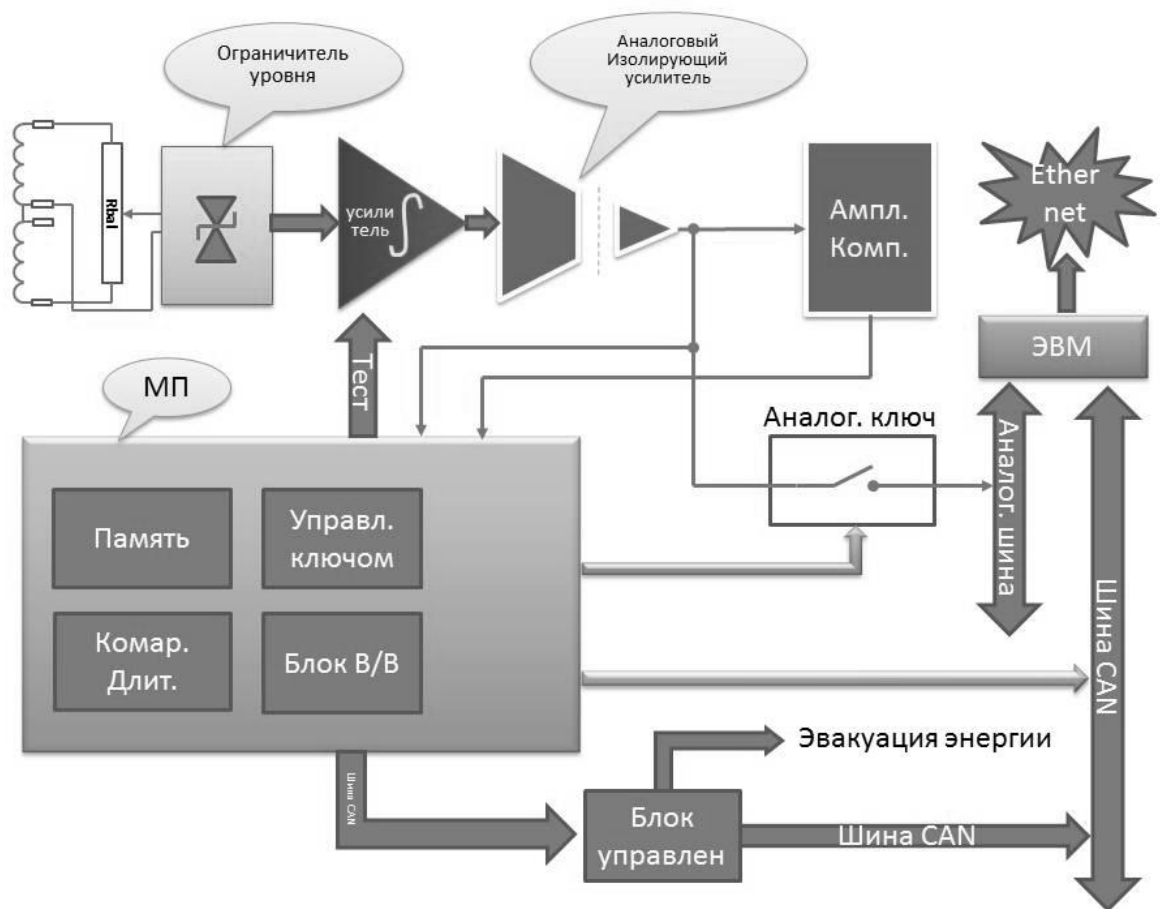


Рис. 4.1. Блок-схема датчика перехода.

Схема проверки датчика также была усовершенствована: вместо громоздкого трансформатора использована схема смещения средней точки (рис. 4.2).

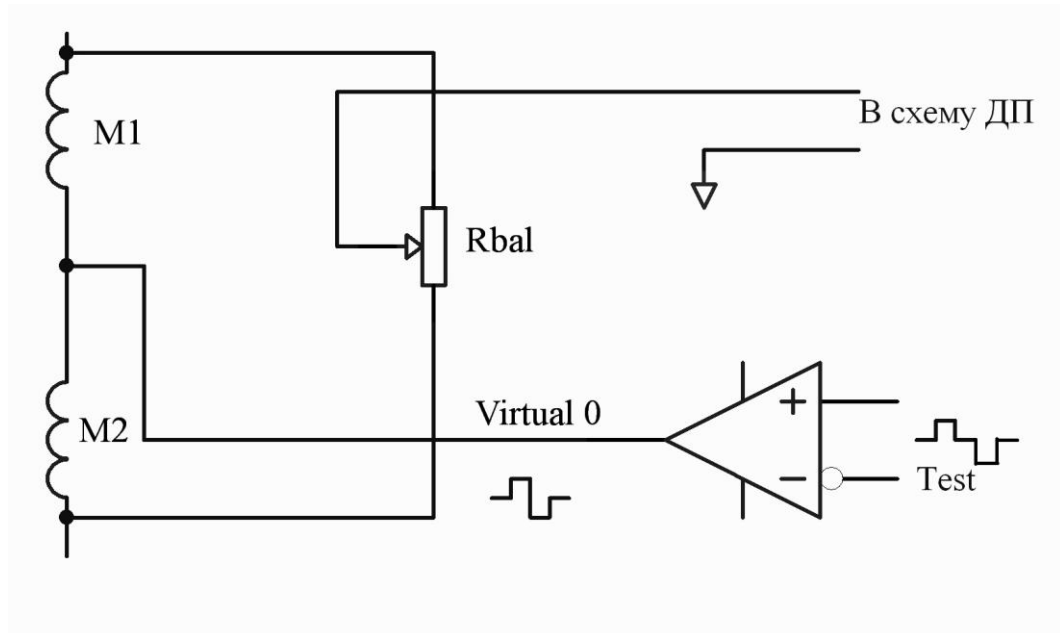


Рис. 4.2. Схема проверки датчика со смещением средней точки.

Средняя тока моста подключена к виртуальному нулю операционного усилителя, который в момент проверки смещается в плюс или минус. Протекающий ток контролируется датчиком перехода. При отсутствии тока генерируется сигнал запрета цикла.

### § 4.3. Этапы и результаты ввода в эксплуатацию

В июне 2009 г. были проведены испытания макета датчика перехода, созданного на основе описанных принципов [26, 27]. Целью испытаний являлась проверка правильности концепции обработки сигнала и отсутствия принципиальных ошибок в схемотехническом построении датчика. Кроме того, было необходимо определить минимальную частоту оцифровки входного сигнала, при которой возможен надежный визуальный контроль формы сигнала разбаланса, а также испытать тракт передачи информации по шине стандарта CAN. В ходе 41-го сеанса Нуклотрона (февраль – март 2010 года) были проведены испытания прототипа датчика с целью зафиксировать реальный процесс перехода обмотки в нормально-проводящую фазу [28].

Для искусственного перевода обмотки магнита в нормально-проводящую фазу использовался установленный на ней нагреватель. Для улучшения условий наблюдения сигнала мост датчика был немного разбалансирован, чтобы был виден цикл поля. На Рис. 4.3 показано главное окно программы для наблюдения выходного сигнала датчика. Можно наблюдать фазы выпрямительного режима (рост магнитного поля), «стола» и инверторного режима (спад поля).

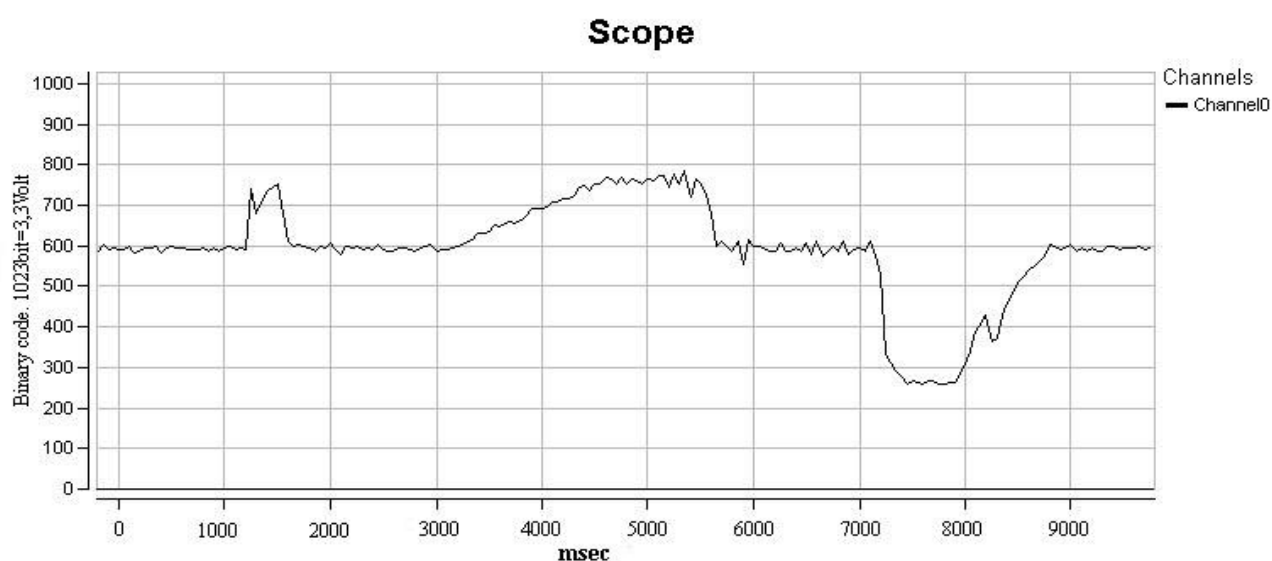


Рис. 4.3. Выходной сигнал датчика перехода при цикле поля [27].

Нагревание обмотки магнита было произведено при трех напряжениях на нагревателе: 12 Вольт, 10 Вольт и 5 Вольт, при этом выделяемая мощность составляла 17, 12 и 3 Ватта соответственно. При первом и втором нагревании активная фаза появлялась и развивалась достаточно быстро - около 25 мс (Рис. 4.4), после чего датчик включал систему эвакуации энергии. При меньшей мощности нагревателя достижение порога срабатывания происходит медленнее.

Таким образом, в результате исследований были получены визуальные отображения процесса перехода в реальном времени при разных энергиях тепловыделения в обмотке магнита. На штатных магнитах Нуклотрона такая информация была получена впервые.

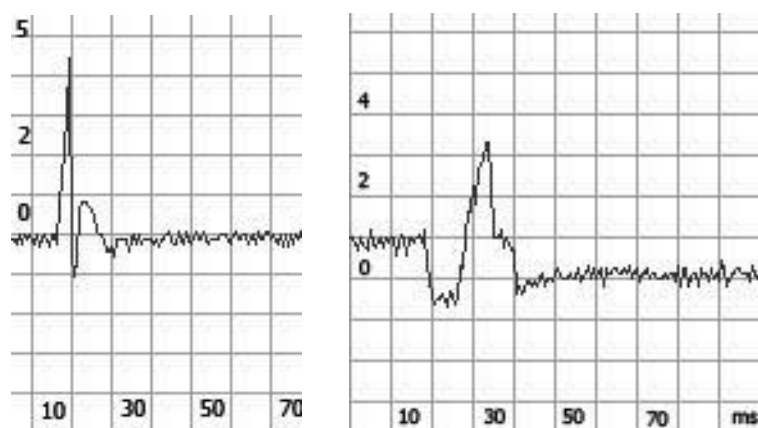


Рис 4.4. Сигналы датчика перехода при мощности нагревателя 17 Вт (левая кривая) и 3 Вт (правая кривая). По горизонтальной оси – время в мс, по вертикальной - напряжение в Вольтах [28].

Кроме того, была продемонстрирована устойчивая и надежная работа датчика, после чего начато изготовление полного комплекта (200 штук с учетом резервирования).

К началу 44-го сеанса (декабрь 2011 года) был изготовлен и установлен на Нуклотроне опытный фрагмент новой системы детектирования перехода, включающий в себя 20 датчиков[29, 30]. Аппаратура монтировалась в блоках стандарта Евромеханика U3 с применением стандартных узлов (источников питания, буферов и т.д.) в стойках 19" (Рис. 4.5).

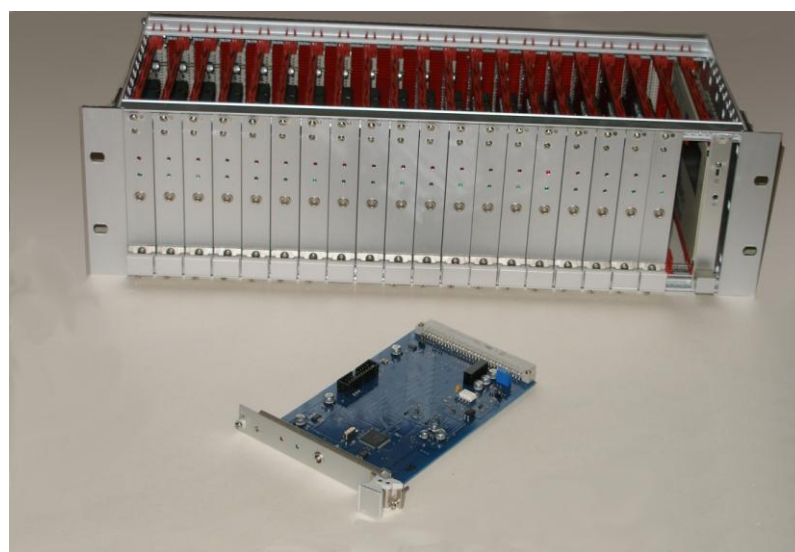


Рис. 4.5. Датчик перехода и блок, содержащий 20 датчиков.

В ходе 44-го и 45-го (февраль-март 2012 года) сеансов проводилась опытная эксплуатация новых датчиков, суммарно они отработали с циклом магнитного поля более 1500 часов. Была продемонстрирована стабильная и надежная работа всех элементов новой системы [30 - 33].

В процессе опытной эксплуатации системы защит на нескольких магнитных элементах были выявлены динамические разбалансы во время подачи напряжения цикла [30, 33]. На начальном участке цикла магнитное поле (и, соответственно, ток, протекающий через магнитные элементы) растет со временем по параболическому закону, который затем переходит в линейный. Это соответствует линейному росту напряжения на магнитных элементах в начале цикла и некоторому постоянному значению на участке линейного роста поля. Разбалансы появлялись на участке роста напряжения и стали явно заметны, когда скорости нарастания напряжения были сильно увеличены. При временах нарастания менее 10 мс они стали критическими и приводили к ложному срабатыванию системы эвакуации энергии. Их характер при оцифровке сигнала разбаланса показан на Рис. 4.6. (Для упрощения анализа сигнала мост был незначительно разбалансирован.)

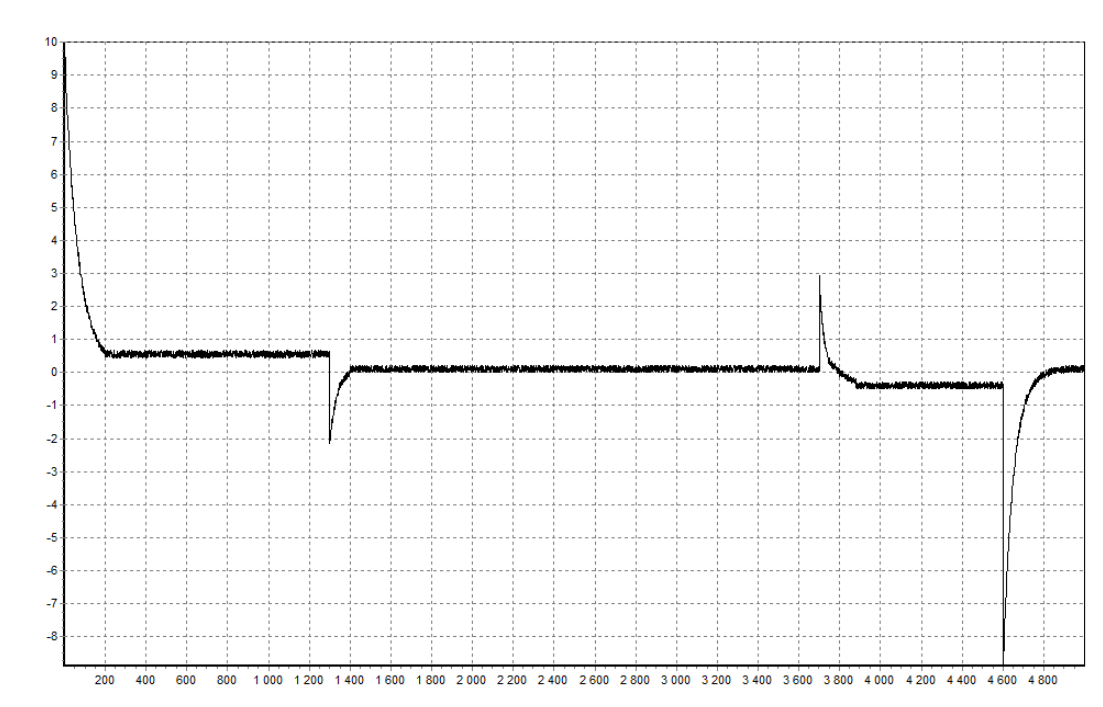


Рис. 4.6. Сигнал разбаланса в течение цикла магнитного поля. 45-й сеанс.

Для анализа этого явления было проведено моделирование работы схемы питания магнитов на PSPICE симуляторе в составе пакета OrCad CADENCE, позволившее сделать вывод, что оно обусловлено паразитными емкостью между средней точкой мостовой схемы и землей в цепях вывода сигнала из криостата (Рис. 4.7). При резком возрастании напряжения емкостной ток создает падение напряжения на защитных резисторах в торцах магнитных элементов. При неравенстве величин этих резисторов (а они, как правило, различаются и имеют разброс минимум 10%) и происходит разбаланс моста.

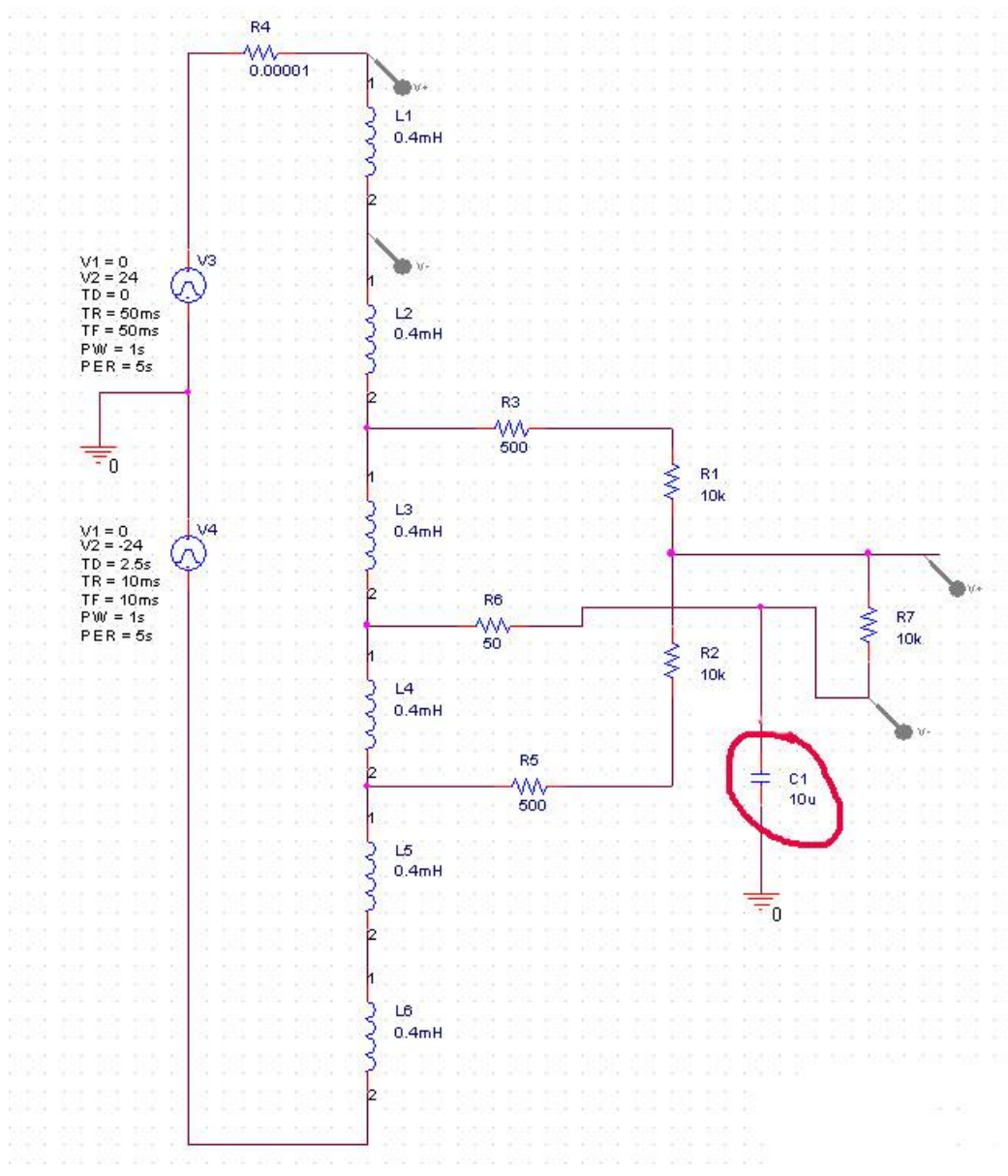


Рис. 4.7. Схема модели. Кружком обведена паразитная емкость.

На схеме: L1 – L6 – магнитные элементы ускорителя, V4, V3 – источник главного тока, R3, R5, R6 – защитные резисторы в криостате, R1, R2 – резисторы моста, R7 – нагрузка (вход датчика перехода).

На Рис. 4.8 показаны результаты моделирования при большой и малой скорости нарастания напряжения питания: на начальном участке цикла время нарастания напряжения выбрано равным 50 мс, при этом зарядка паразитной емкости приводит к импульсному напряжению разбаланса с амплитудой 0.6 В, на втором участке цикла время нарастания напряжения 10 мс, что приводит к амплитуде напряжения разбаланса 2.5 В. Разумное согласие с измеренными значениями подтверждает сделанные выводы. В ходе сеанса избежать ложных срабатываний системы защиты удалось за счет удлинения начальных участков параболического роста поля при увеличении темпа роста поля на линейных участках.

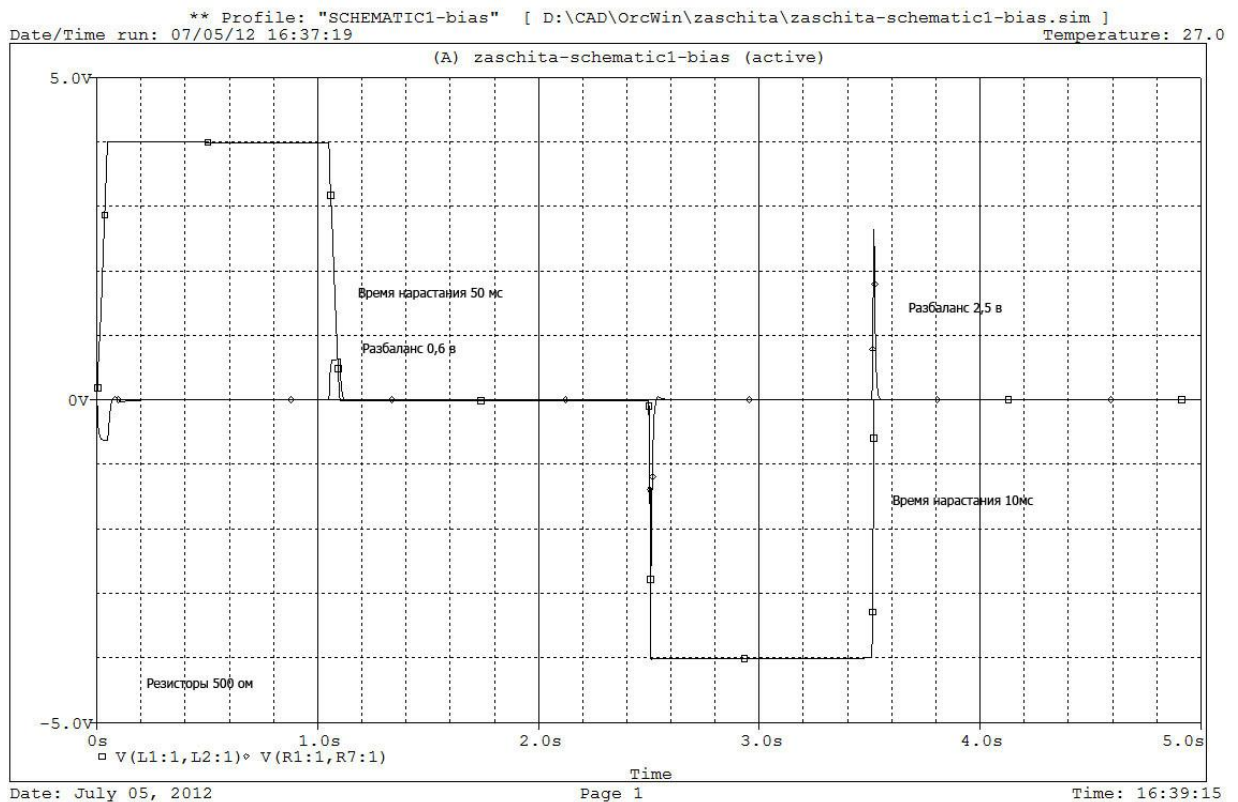


Рис 4.8. Результаты моделирования работы схемы. Малая скорость при подаче напряжения и большая при спаде.

Для радикальной борьбы с этим эффектом достаточно исключить или значительно уменьшить защитные резисторы. В качестве примера на Рис. 4.9 приведены результаты моделирования при уменьшении величины резисторов защиты в 10 раз.

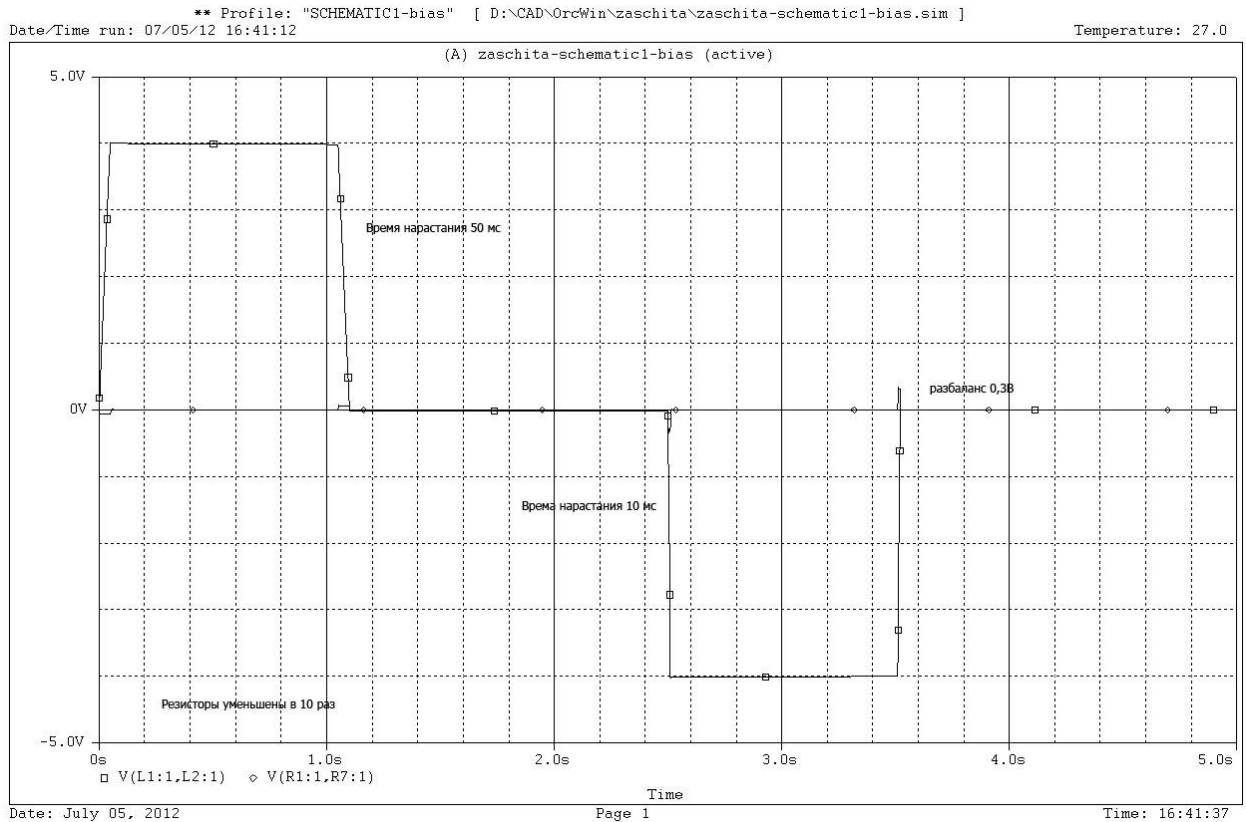


Рис. 4.9. Результаты моделирования работы схемы при малом значении сопротивления защитных резисторов.

По завершению сеанса криостаты на проблемных магнитах были вскрыты и защитные резисторы заменены на более прецизионные. Обеспечение возможности анализировать каждый случай срабатывания защит и являлась одной из задач создания новой системы. В дальнейшем работа по исключению причин ложных срабатываний защит продолжалась, и в результате удалось обеспечить устойчивую работу системы как в режиме длинных «столов» магнитного поля, так и на максимальном проектном поле ускорителя.



Полномасштабное внедрение новой системы было осуществлено в ходе 46-го сеанса Нуклотрона (ноябрь-декабрь 2012 года), а опытный вариант системы управления введен в эксплуатацию в 47-м сеансе (февраль – март 2013) [34, 35].

#### **§ 4.4. Система управления**

Система управления предназначена для сбора информации с датчиков перехода и формирования пакета выходной информации о происходящих в системе событиях. Она позволяет принимать входные управляющие сигналы (начало цикла, пауза, срабатывание ТК и т. п.), формировать сигналы управления внешними устройствами, индицировать локально и удаленно текущее состояние, выводить в локальную сеть информацию о состоянии защит и записанные диаграммы перехода, формировать тестовые сигналы для проверки системы ДП (контроль в паузу, контроль питания, контроль целостности выходных цепей) и принимать решение о запрете цикла при неисправностях.

Структурно система управления состоит из следующих узлов (Рис. 4.10):

- блоки управления низкого уровня, осуществляющие прием и передачу данных с отдельных групп датчиков перехода, расположенных в одном крейте и обрабатывающих входные управляющие сигналы, сигналы передачи данных и осуществляющие гальваническую развязку датчиков перехода крейта и схемы управления. Содержат цифровые изоляторы сигналов, контроллеры CAN- шины для передачи данных в общий блок управления, промежуточные усилители аналогового сигнала с выбранного датчика перехода.
- общий блок управления на основе микропроцессора LPC1768, осуществляющий прием и передачу сигналов между блоками управления низкого уровня и связь с персональным компьютером. Интерфейсный узел блока управления осуществляет формирование управляющих сигналов для управления блоками низкого уровня, приемом и усилением

аналогового сигнала с датчиков перехода на общую шину, формированием CAN-интерфейса для связи с компьютером.

- микроконтроллерная часть (uCU) на основе LPC1768, обеспечивает автономную работу системы и предназначена для обработки сигналов от системы управления циклом, проверки исправности и индикации состояния всех устройств, формирования сигналов на снятие или запрет цикла.

- Персональный компьютер принимает данные с блока управления и позволяет отображать всю информацию о состоянии системы защит и управлять параметрами системы. ПК также содержит программы для удаленного управления системой защит по сети Ethernet.



Рис. 4.10. Блок схема системы управления [34].

На Рис. 4.11 представлено окно пользовательского приложения, которое содержит элементы управления системой датчиков и элементы отображения событий в системе и графического представления произошедшего процесса. В правой части окна расположены элементы управления датчиком (кнопки и переключатели), позволяющие тестировать конкретный датчик или группу датчиков, а так же информацию о сработавшем элементе и его местонахождении в системе.

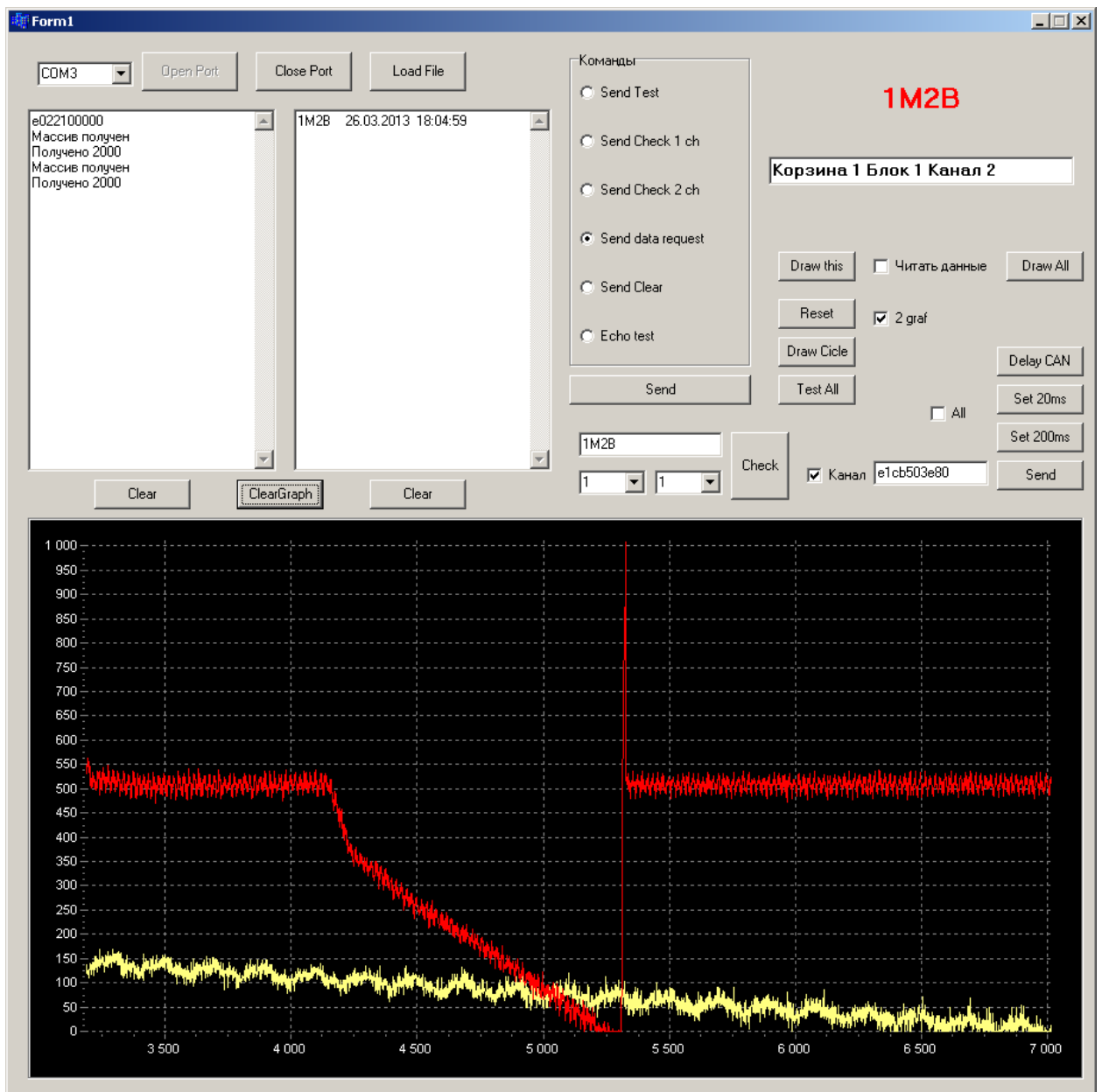


Рис 4.11. Окно пользовательского приложения системы управления.

В левой части окна находятся поля со служебной информацией, отражающие работу системы, ее статус и неисправности. Внизу расположено графическое окно, в котором отображается характер процессов в датчике перехода. На показанном рисунке изображен плавный нагрев токоввода в двух масштабах: красная линия показывает развитие процесса за время 8000 мсек, желтая – участок 800 мсек до срабатывания. Отображение в масштабе 8000 мсек можно отключить.

Ввод в эксплуатацию новой системы упростил процедуру выявления ложных срабатываний и помог оперативно устранять их причины. Это позволило в 47-м сеансе, например, обеспечить стабильную работу магнитной системы в режимах длительной, до 1000 сек, циркуляции пучка на «столе» поля и провести успешный эксперимент по стохастическому охлаждению пучка дейтронов.

Кроме того в ходе 47-го сеанса была набрана большая статистика переходов при полях дипольных магнитов до 1.9 Тл и длительности столов до 10 сек, что позволило выявить «слабые» места, и подготовить ускоритель к стабильной работе при проектной величине поля. Одним из результатов этой работы явилось ускорение пучка до проектной энергии Нуклотрона, впервые осуществленное в декабре 2013 года.

Новая система управления обеспечила возможность анализа динамики перехода. В качестве примера на рис. 4.12а и рис. 4.12б приведены сигналы датчика при развитии в обмотке контролируемого элемента нормально-проводящей фазы. На рисунке 4.12а показано развитие разогрева спая и возникновения активной фазы на прямолинейном участке токоввода в процессе протекания тока через ускоритель.

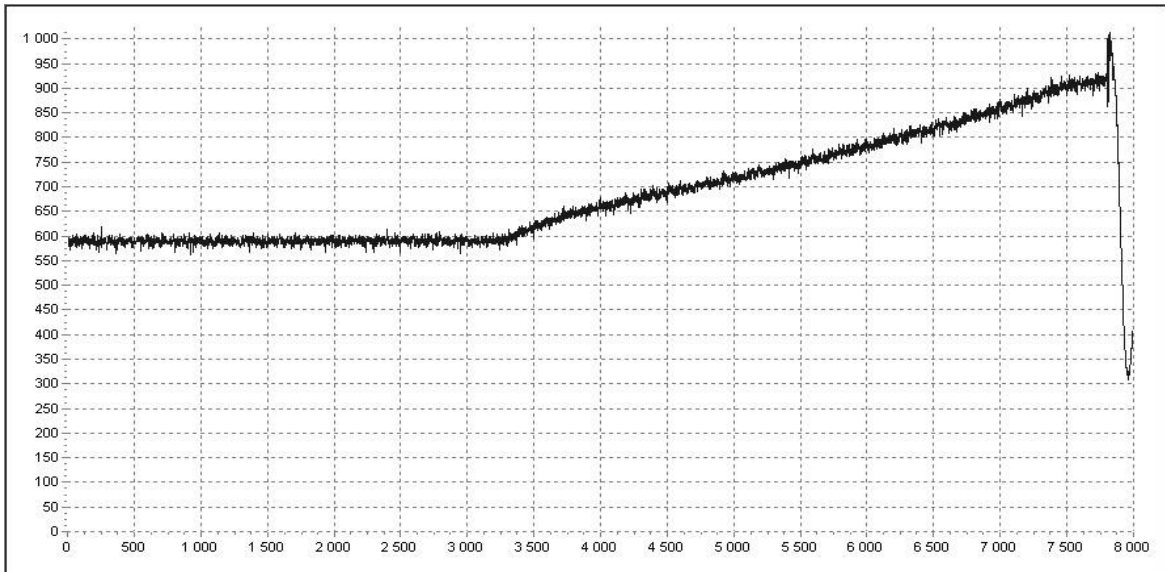


Рис. 4.12а. Сигнал датчика при разогреве сая. Вертикальная ось – цифровой отсчет измерительного АЦП – 1023 max, или 3,3 В. Горизонтальная ось – время в сотнях мсек, т.е. вся шкала 800 мсек

До момента 330 мсек (точка 3300 на графике) сохранялась сверхпроводящее состояние, а с этого момента начался разогрев сая. Напряжение разбаланса плавно нарастало в течении примерно 450 мсек до точки 780 мсек. В этот момент напряжение достигло порога срабатывания и была включена система эвакуации энергии (скачок на графике в точке 7800-8000). Зафиксированный процесс довольно медленный так как протекающий ток был мал (около 600 ампер). На рисунке 4.11б показано развитие активной фазы в магнитном элементе. В момент времени ~765 мсек (7650 по шкале графика) произошла потеря сверхпроводимости в точке магнита, появился разбаланс который достиг порога срабатывания примерно через 20 мсек. В точке ~780 (7800 по графику) началась эвакуация энергии.

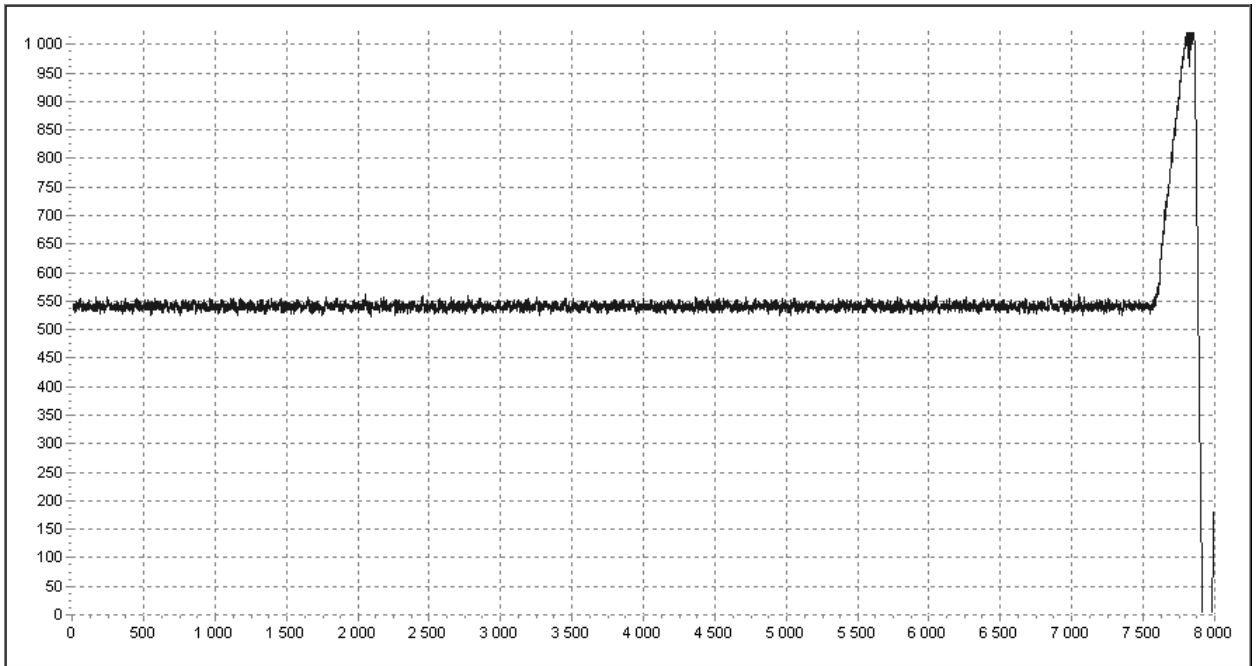


Рис. 4.126. Сигнал датчика при переходе обмотки магнита в нормально-проводящую фазу.

Вертикальная ось – цифровой отсчет измерительного АЦП – 1023 max, или 3,3 В

Горизонтальная ось – время в сотнях мсек, т.е. вся шкала 800 мсек

#### § 4.5. Выводы

В ходе модернизации ускорительного комплекса Нуклотрон была разработана, испытана и введена в эксплуатацию новая система детектирования переходов, основанная на современных технических и конструктивных решениях.

В схемном решении датчика перехода применена гальваническая развязка сигнала моста на основе аналогового изолирующего усилителя, что позволяет наблюдать, анализировать, записывать и удаленно передавать аналоговый сигнал датчика перехода.

В качестве обрабатывающего элемента применен микропроцессор. Это позволяет более полно анализировать сигнал перехода, оцифровывать его, записывать в память.

Все датчики и система управления и отображения информации объединены в CAN-сеть, что позволяет удаленно обращаться к любому датчику и считывать с него информацию.

Созданная система управления позволяет принимать входные управляющие сигналы, формировать сигналы управления внешними устройствами, индицировать локально и удаленно текущее состояние, выводить в локальную сеть информацию о состоянии защит и записанные диаграммы перехода, формировать тестовые сигналы для проверки системы датчиков перехода и принимать решение о запрете цикла при неисправностях.

Кроме того, система управления датчиками перехода позволяет анализировать все случаи срабатывания защит, что дает экспериментальный материал для дальнейшего развития конструкции датчика. В первую очередь это относится к выявлению причин и исключению случаев срабатывания защит в отсутствие перехода элементов в нормально-проводящую фазу.

Ввод в эксплуатацию новой системы детектирования переходов позволил обеспечить безопасную и стабильную работу магнитной системы Нуклотрона при проектной величине поля и в режиме с длинными «столами» магнитного поля. В качестве наиболее важных результатов можно отметить ускорение пучка до проектной энергии Нуклотрона, впервые осуществленное в декабре 2013 года, и реализацию в марте 2013 года стохастического охлаждения пучка дейтронов, циркулирующего на «столе» поля длительностью до 10 минут.

## **Глава 5. Концептуальный проект системы детектирования переходов для проекта NICA**

### **§ 5.1. Особенности режимов работы СП установок комплекса NICA**

В рамках создания в ЛФВЭ ОИЯИ ускорительно-коллайдерного комплекса NICA проектируется несколько новых сверхпроводящих установок: Бустерный синхротрон, два кольца коллайдера для столкновения пучков тяжелых ионов и поляризованных пучков легких ионов, канал транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон. Кроме того, создается участок для сборки и тестирования СП магнитов как для комплекса NICA[4], так и для международного ускорительного комплекса FAIR [5]. Параллельно с ускорительным комплексом проектируются так же и два основных детектора – MPD (Multi Purpose Detector) и SPD (Spin Physics Detector), которые включают в себя СП магнитные элементы, нуждающиеся в системе детектирования переходов.

Режимы работы различных СП установок комплекса NICA принципиально различны, что требует использования разных подходов к построению систем детектирования переходов.

Бустер, как и Нуклотрон, является быстроциклирующим синхротроном. Основной задачей Бустера является предварительное ускорение тяжелых ионов до энергии, обеспечивающей их эффективную обдирку до голых ядер перед инжекцией в Нуклотрон. По структуре системы защиты и по параметрам магнитов эти два ускорителя достаточно близки, поэтому система детектирования переходов Бустера может быть построена на тех же принципах, что и хорошо зарекомендовавшая себя система детектирования Нуклотрона. При этом датчик перехода должен работать по мостовой схеме. В последнее время проводились разработки систем детектирования переходов для быстроциклирующих синхротронов SIS-100 [36] и SIS-300 проекта FAIR [37], опыт



которых был так же учтен при проектировании датчика перехода для установок комплекса NICA.

Коллайдер большую часть времени будет работать в режиме накопителя: ток в обоих кольцах в процессе столкновения пучков в течение нескольких часов поддерживается на постоянном уровне. Однако, в проекте системы питания коллайдера предусмотрен режим доускорения (или торможения) пучков с относительно невысоким темпом изменения поля – до 0.1 Тл/с. Магнитная система коллайдера NICA, как и Большого Адронного Коллайдера (Large Hadron Collider - LHC) в ЦЕРН, основана на использовании двухапертурных магнитов. Пучковые камеры двух колец разнесены по вертикали на 32 см, верхняя и нижняя половины магнитов идентичны. Однако, физическая программа экспериментов включает в себя режим столкновения пучков частиц разного сорта, когда токи питания верхнего и нижнего колец коллайдера имеют различную величину. Еще одним существенным отличием в условиях работы системы детектирования коллайдера от систем Нуклотрона и Бустера является наличие в коллайдере мощных высокочастотных систем (суммарное напряжение на одном обороте может достигать 1 МВ, в Нуклотроне суммарное напряжение не превышает 18 кВ, в Бустере – 10 кВ), обеспечивающих режим столкновения коротких сгустков. Это может являться дополнительным источником наводок на датчики.

Канал перевода пучка из Бустера в Нуклотрон будет работать в непрерывном режиме. Он включает в себя 5 дипольных магнитов, семь квадрупольных линз и два магнита Ламбертсона, причем, только дипольные магниты имеют одинаковую конструкцию и могут быть объединены в одно семейство по системе питания (рассматривается вариант с включением в это семейство и магнитов Ламбертсона), все остальные магниты питаются от отдельных источников тока. Необходимость использования сверхпроводящих магнитов в этом канале определяется в первую очередь ограниченным пространством для их размещения. Ввиду большой ( $12 \text{ кА/см}^2$ )

конструктивной плотности тока в СП обмотке, металлоемкость СП магнита оказывается примерно в 5 раз меньше по сравнению с «теплым» магнитом, имеющим такую же апертуру. Несколько элементов канала располагается внутри ярма магнита Синхрофазотрона и над магнитно-криостатной структурой, где из-за геометрических ограничений разместить нормально-проводящие магниты оказывается невозможно.

Таким образом, в составе ускорительного комплекса появляются сверхпроводящие устройства, работающие в непрерывном или квази-непрерывном режиме (к ним относятся также и СП соленоиды двух детекторов коллайдера). При проектировании системы детектирования переходов в устройствах, работающих в непрерывном режиме или в режиме длинных «столов» поля, наиболее современным является опыт создания такой системы для LHC [23].

На LHC используются оба известных метода обнаружения нормально-проводящей фазы. Для корректирующих магнитов с током до 600 А используется метод измерения производной тока с помощью датчика Холла и разделения резистивной и реактивной составляющей в измеренном напряжении на контролируемом элементе. Вычисления индуктивной составляющей производится с помощью цифрового сигнального процессора (DSP) и цифровых фильтров.

Для структурных магнитов с током до 7,5 кА, используется мостовой метод детектирования, при этом плечами моста являются идентичные обмотки соседних апертур двухапертурного магнита (Рис. 5.1).

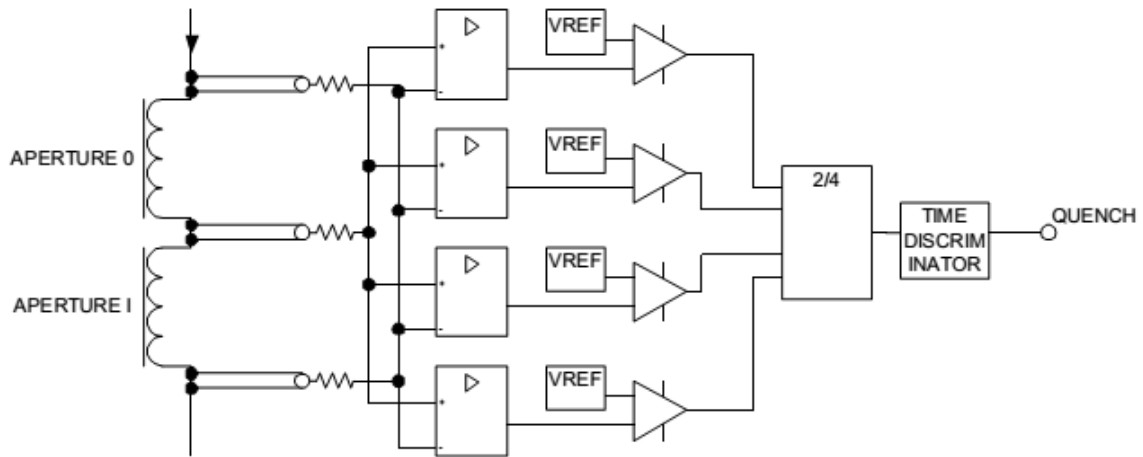


Рис 5.1. Схема мостовой защиты на магнитах ЛНС [23].

Для обеспечения требуемой надежности и помехозащищенности системы используется 4-х кратное дублирование. Напряжения на каждой паре обмоток сравниваются 4-мя мостовыми датчиками на основе аналоговых изолирующих усилителей. После амплитудного компаратора сигналы с них поступают на тригер, который выдает выходной сигнал в том случае, когда порог по напряжению превышен на двух или более датчиках одновременно. Такая схема существенно снижает вероятность срабатывание системы защиты от помех и обеспечивает детектирование перехода при неисправности одного или даже двух датчиков. Проверка исправности датчиков при этом может производиться в паузе между циклами магнитного поля. В мостовых датчиках используются постоянные резисторы высокой точности, которые служат также и для защиты от короткого замыкания в измерительных проводах.

Система датчиков перехода воздействует на систему управления, которая включает токогасящие резисторы, нагреватели обмоток (если необходимо) и управляет источником питания (Рис. 5.2).

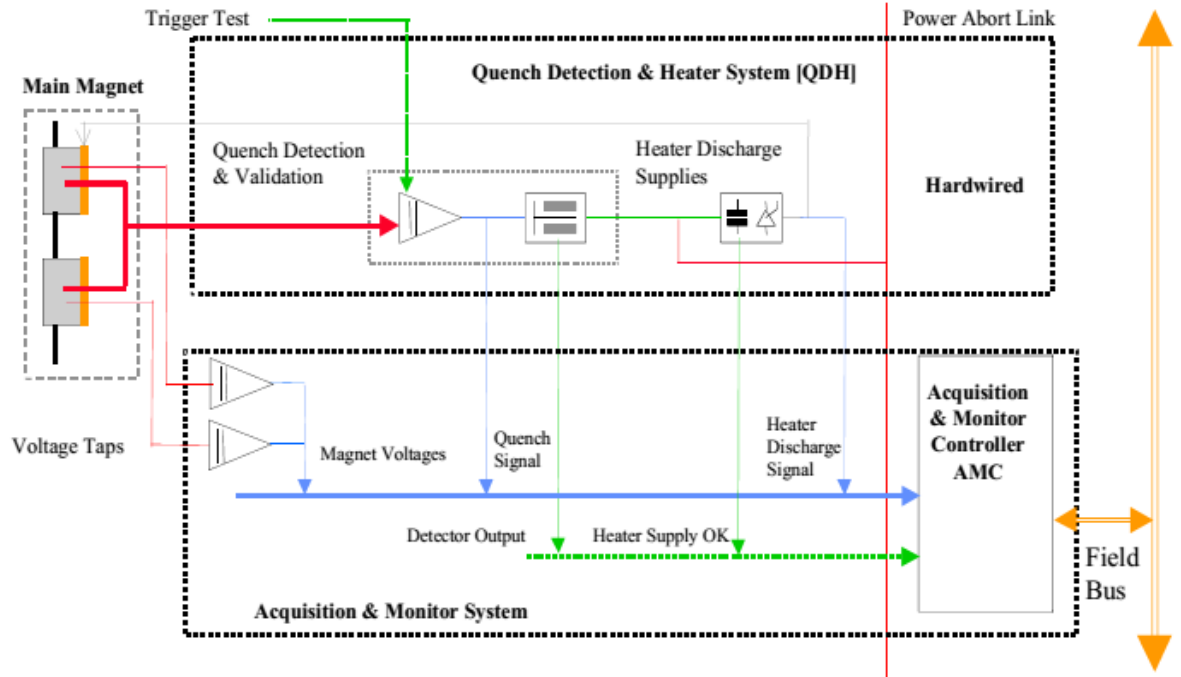


Рис 5.2. Блок-схема защиты на LHC [21].

Кроме того, в систему управления и сбора данных через изолирующие усилители поступают сигналы напряжения на каждом из магнитов.

## § 5.2. Концепция построения системы детектирования

Концепция построения системы детектирования переходов на вновь создаваемых СП установках комплекса NICA [38] разработана как на основе результатов эксплуатации системы детектирования переходов СП синхротрона Нуклотрон, так и с учетом опыта разработки других быстроциклирующих СП синхротронов и эксплуатации системы детектирования коллайдера LHC.

Для элементов канала транспортировки пучка из Бустера в Нуклотрон и корректирующих магнитов коллайдера решено использовать разделения резистивной и реактивной составляющей в измеренном напряжении на контролируемом элементе, при этом для измерения производной тока в конструкцию магнитов закладываются измерительные обмотки. Для контроля структурных магнитов Бустера и коллайдера решено использовать мостовую схему. Для отстройки от мощных источников помех в коллайдере предусматривается возможность дублирования функций и использование триггера. Кроме

того, подавление помех решено осуществить за счет применения цифровых фильтров. Для устройств, работающих в непрерывном режиме или режиме длинных «столов» проверка гальванической связи всех цепей в датчиках должна осуществляться без подачи импульсных сигналов.

Для выполнения всех этих функций используется универсальный датчик перехода. Все датчики однотипным образом включаются в систему управления.

Возможность применения датчика как для контроля сигнала с мостовой схемы, так и для непосредственного измерения сигналов на индуктивных элементах и их сравнения (либо сравнения сигнала с контролируемого индуктивного элемента и опорного сигнала производной поля) обеспечивается за счет размещения в нем двух независимых каналов измерения сигнала. Это также позволяет при необходимости реализовать дублирование функций. На борту датчика размещается микроконтроллер, обеспечивающий выполнение требуемого режима работы и реализующий цифровую фильтрацию сигналов.

### **§ 5.3. Конструкция универсального датчика перехода**

Схема (Рис. 5.3) состоит из двух изолированных каналов, каждый из которых может получать аналоговый сигнал с максимальной амплитудой  $\pm 10$  Вольт. Чувствительность канала регулируется в широких пределах входными усилителями, поэтому источником сигнала для схемы может быть как сигнал с моста ( $\sim 100$  мВ) так и с индуктивного элемента ( $\sim 5$  В). Далее входные сигналы оцифровываются АЦП и через оптический изолятор передаются на процессорный модуль, который их и анализирует. Анализ может проводиться по амплитудным и временным характеристикам сигнала, или путем сравнения сигналов между собой для выделения резистивной составляющей.

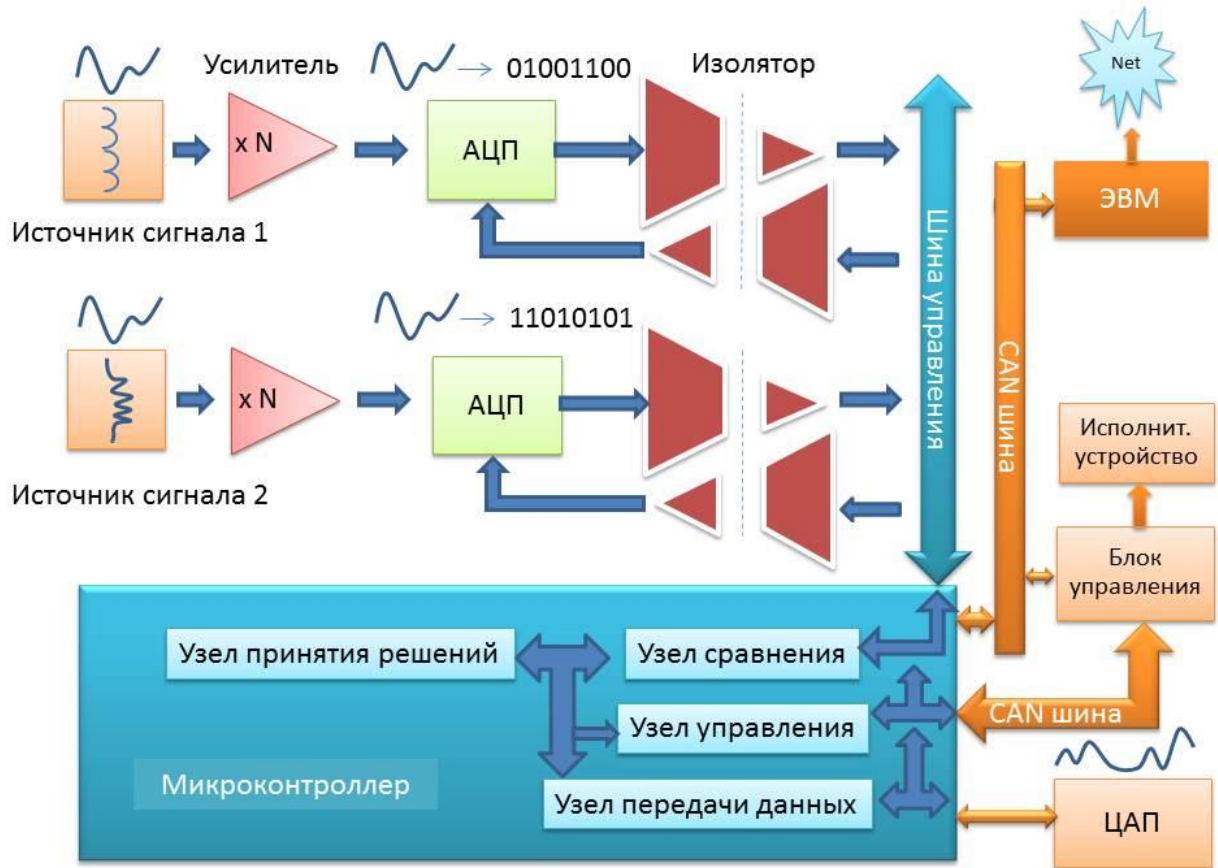


Рис. 5.3. Блок схема универсального датчика перехода.

В схеме датчика применены современные компоненты, такие как RAILtoRAIL усилители (LT1880), двухполярные широкодиапазонные АЦП (AD7895), ARM микропроцессор на ядре Cortex M3 фирмы NXP (LPC1768). Практически для всех компонентов использован SMD монтаж (Рис. 5.4).

Правильность концепции обработки сигнала и отсутствие принципиальных ошибок в схемотехническом построении были проверены на макете датчика, который был протестирован в ходе 47-го сеансе Нуклотрона (февраль – март 2013). При этом датчик использовался в режиме работы по мостовой схеме вместо одного из штатных датчиков перехода. Сигналы регистрировались с помощью новой системы управления датчиками перехода.

Начало серийного изготовления датчиков намечено на 2014 год.



Рис. 5.4. Плата универсального датчика перехода.

## § 5.4. Схема проверки цепей связи и датчика

Прямое подключение индуктивного элемента позволило усовершенствовать и систему проверки цепей связи и датчика, которая теперь может контролировать гальваническую связь в датчике всех соединений без подачи импульсных сигналов. В первых конструкциях ДП применялась схема проверки датчика импульсным сигналом, который являлся тестовым для цепей потенциальных концов и всей электронной схемы датчика. Инициировать проверку можно было только в отсутствие тока в магнитной системе.

В новой конструкции датчика проверка может производиться отдельно для потенциальных цепей СЗ и для электроники системы защит. Проверка работоспособности системы может производиться в любое время цикла, что важно при работе в режиме со сверхдлинными «столами» магнитного поля.

При подаче тестового напряжения на неинвертирующий вход ОУ (Рис. 5.5), напряжение на выходе усилителя обуславливается делителем  $R$ - $R$ - $2R$ / $2R$  и равно одной трети тестового если нет обрыва. При обрыве одной линии моста напряжение будет равно трем четвертям тестового, при обрыве обеих линий или средней линии напряжение будет равно тестовому. Измеряя выходное напряжение усилителя легко определить целостность цепей связи.

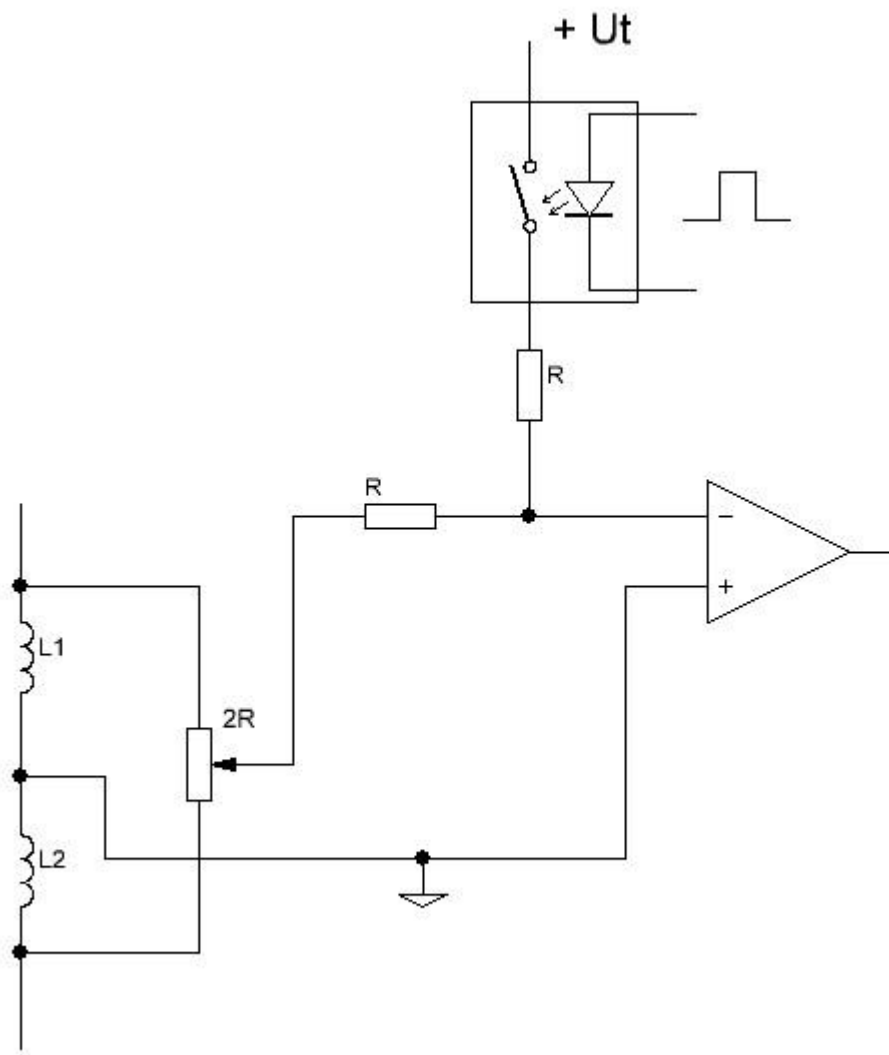


Рис. 5.5. Схема проверки цепей связи и датчика.



## § 5.5. Подавление помех

Критерием наличия перехода является одновременное превышение порога по амплитуде напряжения  $V_{th}$  и по длительности -  $T_v$ . В системе детектирования переходов на Нуклотроне порог срабатывания датчика, контролирующего соседние магниты, составляет  $V_{th} \geq 60$  мВ, время превышения порога  $T_v$ , являющееся признаком перехода, варьируется в интервале 1 - 5 мс.

Для примера на Рис. 5.6 изображен типовой сигнал с датчика перехода Нуклотрона при обнаружении перехода и срабатывании защиты, на котором видно, что имеющийся шум много меньше установленного порога срабатывания.

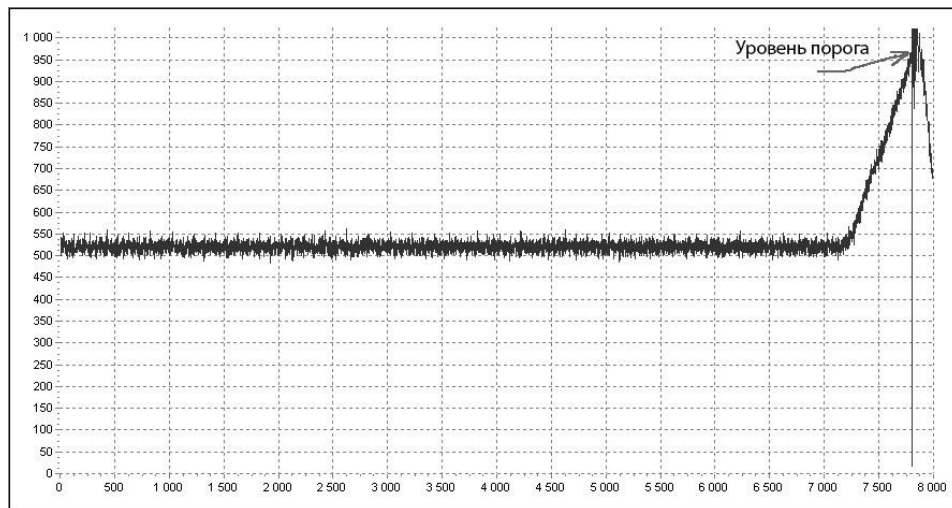


Рис 5.6. Пример оцифрованного сигнала датчика при обнаружении перехода. По вертикальной оси – цифровой отсчет измерительного АЦП, вся шкала соответствует 3,3 В, нулевой уровень – примерно 500. По горизонтальной оси – время в сотнях мс, т.е. вся шкала 800 мс. Вертикальная линия обозначает момент времени срабатывания системы эвакуации энергии.

Тем не менее, на кольце ускорителя имеются места, где отмечается большая зашумленность входного сигнала датчика. Это связано с расположением рядом с контролируемым элементом и линиями связи мощных нагрузок и других установок, излучающих помехи. Еще больший уровень помех ожидается при работе коллайдера NICA для датчиков расположенных в окрестности устройств высокочастотной системы и

импульсных устройств системы инъекции пучка. Для подавления таких шумов в новом датчике применен метод цифровой фильтрации входного сигнала.

К цифровому фильтру в датчике предъявляются жесткие требования:

- работа в реальном времени при единичном семплировании с периодом 4,8 мкс,
- Минимальная временная задержка сигнала,
- Отсутствие фазовых искажений,
- Минимальная реакция на скачок входного сигнала,
- простой алгоритм реализации.

По заданным критериям был выбран фильтр низкой частоты, реализованный методом скользящего среднего. Применение фильтра показало хорошие результаты на реальном сигнале с датчика перехода (рис. 5.7).

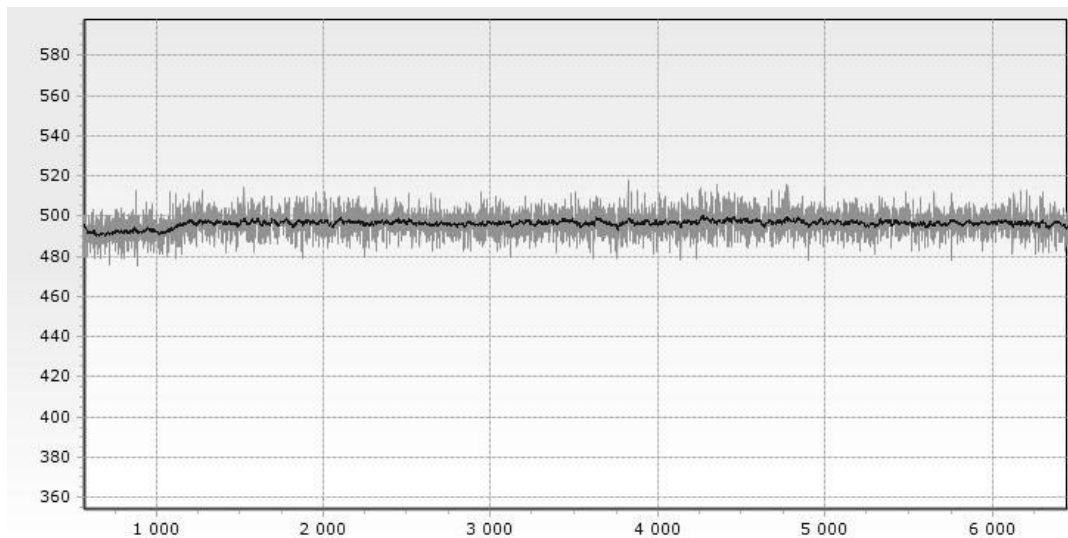


Рис 5.7. Сигнал с ДП на входе (серая кривая) и выходе (черная кривая) фильтра. Единицы измерения те же, что и на Рис. 5.6.

Степень подавления шума регулируется программно изменением коэффициента фильтра. Таким образом можно настраивать датчик индивидуально для каждого его конкретного расположения на кольце ускорителя. Следует иметь в виду, что фильтр вносит временную задержку в исходный сигнал (в зависимости от коэффициента от 500 мкс до 2 мс), поэтому требуется корректировка уставок датчика при его применении.

## § 5.4. Выводы

На основе результатов эксплуатации системы детектирования переходов СП синхротрона Нуклотрон, и с учетом опыта разработки других быстроциклирующих СП синхротронов и эксплуатации системы детектирования коллайдера LHC разработана концепция построения системы детектирования переходов на вновь создаваемых СП установках комплекса NICA.

Концепция основана на применении универсального датчика, позволяющего реализовать оба метода детектирования перехода и обеспечивающего возможность дублирования функций. Проверка работоспособности системы осуществляется без подачи импульсных сигналов и может производиться в любое время цикла. Для дополнительного подавления помех используется цифровая фильтрация входного сигнала.

Правильность концепции обработки сигнала и отсутствие принципиальных ошибок в схемотехническом построении были проверены на макете датчика, протестированном в ходе сеанса Нуклотрона.

Начало серийного изготовления датчиков намечено на 2014 год.

## Заключение

1. В ходе выполнения данной работы была разработана концепция построения и создана система детектирования переходов, обеспечившая надежную работу первого в мире быстроциклирующего СП синхротрона Нуклотрон при проведении на нем пуско-наладочных работ и, впоследствии, в течение 15 лет эксплуатации. Датчик перехода основан на использовании мостовой схемы. В отличие от имевшихся аналогов, в разработанном датчике амплитудный компаратор размещен на изолированной части схемы, временной компаратор – на заземленной, а гальваническая развязка выполнена на основе цифровой оптопары.
2. Для защиты СП устройств системы медленного вывода пучка из Нуклотрона структура системы детектирования переходов была доработана, разработана и испытана новая конструкция датчика перехода, основанная на той же структурной схеме, но выполненная с применением более современной элементной базы. Созданная и введенная в эксплуатацию система обеспечила надежную безаварийную работу устройств системы медленного вывода.
3. В ходе модернизации ускорительного комплекса была создана и введена в эксплуатацию новая система детектирования переходов, основанная на современных схемотехнических решениях и включающая в себя многофункциональную систему автоматического управления. Ее использование позволило провести успешный эксперимент по стохастическому охлаждению пучка дейтронов, и осуществить ускорение пучка до максимальной проектной энергии.
4. Разработана концепция построения системы детектирования переходов на вновь создаваемых СП установках комплекса NICA, основанная на применении универсального датчика перехода. Для реализации всех необходимых функций на борту датчика размещены два изолированных канала, оцифрованные сигналы с

которых передаются на процессорный модуль через оптический изолятор. Проверка работоспособности системы осуществляется без подачи импульсных сигналов и может производиться в любое время цикла. Для подавления помех используется цифровая фильтрация входного сигнала. Макет датчика успешно протестирован в сеансе работы Нуклотрона. Разработанная концепция построения системы детектирования удовлетворяет всем требованиям проекта NICA.

## **Благодарности**

Прежде всего, автор отмечает своих наставников Смирнова А.А, Коваленко А.Д, внесших большой вклад в достижение конечного результата.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам отдела НИЭТО ЛВЭ (ныне ЛФВЭ) и в частности сотрудникам группы защиты СПЭ, принявших активное участие в создании и испытаниях датчиков перехода и системы защиты в целом.

Автор выражает глубокую благодарность научному руководителю без руководства и активного участия которого, эта диссертация просто не появилась бы.

Также хочется отметить, что автор трудился в творческом коллективе с высокими профессионалами без участия которых данная работа не была бы выполнена.

Автор выражает искреннюю признательность за плодотворные дискуссии по основным темам, дружеское участие и помощь в систематизации и изложении материала.

Автор искренне благодарит коллектив НЭОРС и Ускорительного отделения ЛФВЭ за длительное и полезное сотрудничество и непосредственную помощь в работе.

## Список литературы

1. А.М.Балдин. «О развитии ускорительного комплекса в ЛВЭ ОИЯИ и исследованиях по релятивистской ядерной физике.» В сб.: «Нуклотрон и релятивистская ядерная физика». ОИЯИ, 8309, Дубна, 1974.
2. А.М. Baldin и др., “Superconducting fast cycling magnets of the Nuclotron”, IEEE Trans. on Appl. Supercond., vol.5, pp.875-877, June 1995.
3. A.D.Kovalenko., “Status of the Nuclotron”, EPAC’94, London, June 1994, Proc. of v.1, pp. 161-164, (1995).
4. A.N.Sissakian for NICA collaboration, “Nuclotron-based ion collider facility” Intern. conference LP’07, Daegu, Korea, August 2007.
5. W. F. Henning, FAIR – an international accelerator facility for research with ions and antiprotons, Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/e04/PAPERS/TUXCH02.PDF>.
6. R.H. Flora, G.S. Tool, “Doubler-Tevatron uP Quench Protection System”, IEEE Transactions on Nuclear Science Vol. NS-26, NO. 3, June 1979.
7. R. Flora, J. Saariviria, G. Tool, D. Voy, “The Energy Saver/Doubler Quench Protection Monitor System”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-28, No. 3, June 1981.
8. S. Lackey, C. Briegel, L. Chapman, R. Flora, K. Martin, T. Savord, “A VME Based Quench Protection Monitor for the Tevatron Low Beta Quadrupoles”, PAC, 1993.
9. K.H. Mess, “Quench Protection at HERA”, PAC’87. 1987  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/weppd024.pdf>
10. H. Kaiser, "Design of Superconducting Dipole for HERA", Proceedings of the 13th International Conference on High Energy Accelerators, Novosibirsk, USSR. 1986
11. K.E. Robins, W.B. Sampson, M.G. Thomas, “Superconducting Magnet Quench Protection for ISABELLE”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-24, No. 3, June 1977.
12. A.J. Stevens, J.G. Cottingham, K. Robins, W.B. Sampson, “Quench Protection Studies on CBA Magnets”, IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-30, No, 4, August 1983.
13. C.R. Conkling Jr, “RHIC Beam Permit and Quench Detection Communications System”, PAC’98, 1998.
14. P.A. Thompson, J. Cottingham, P. Dahl, R. Fernow, Y. Garber, A. Ghosh, C. Goodzeit, A. Greene, H. Hahn, J. Herrera, S. Kahn, E. Kelly, G. Morgan, S. Plate, A. Prodell,

- W. Sampson, W. Schneider, R. Shutt, P. Wanderer, 3. Willen, "Superconducting magnet system for RHIC", IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. NS-37. No 5. October 1985.
15. V.N. Alferov, V.L. Brook, A.F. Dunaitsev, S.G. Goloborodko, P.N. Kazakov, V.V. Komarov, B. Kuiper, A.F. Lukyantsev, M.S. Mikheev, V.P. Sakharov, E.D. Scherbakov, N.N. Trofimov, V.P. Voevodin, S.A. Zelepoukin, "The UNK Control System", PAC'91, 1991.
  16. О.В.Афанасьев, Л.М.Васильев, О.М.Веселов и др., Система детектирования нормальной фазы сверхпроводящих магнитов УНК, Труды XIII всероссийского совещания по ускорителям заряженных частиц, т.2, стр. 350-355, Протвино, 1992
  17. Andriishchin, O. Afanasiev, V. Gridasov, A. Erochin, E. Kachtanov, K. Myznikov, V. Sytchev, L. Vassiliev, O. Veselov, N. Yarygin, "Study of UNK Quench Protection System on the String of 4 UNK Superconducting Magnets", EPAC'94, 1994
  18. A. Alexandrov, A. Andriishchin, A. Erochin, V. Gridasov, E. Kashtanov, N. Kulin, K. Myznikov, V. Pleskach, V. Sytchev, L. Vassiliev, O. Vesolov, S. Zintchenko, "Study of Quench Development in the String of UNK Superconducting Magnets", PAC'96, 1996
  19. А.А.Смирнов. НУКЛОТРОН – новая технология сверхпроводящей магнитной системы синхрофазотрона. Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2001, т.32, вып.1. с.96-141
  20. А.А.Смирнов, А.Д.Коваленко, «Нуклотрон – сверхпроводящий ускоритель ядер в ЛВЭ ОИЯИ: создание, работа, развитие», Письма в ЭЧАЯ, т.1 (6(123)), 11, 2004
  21. K. Dahlerup-Petersen, R. Denz, J. L. Gomez-Costa, D. Hagedorn, P. Proudlock, F. Rodriguez-Mateos, R. Schmidt CERN, Geneva, Switzerland F. Sonnemann, RWTH Aachen, Germany, "The protection system for the superconducting elements of the large hadron collider at CERN", Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999.
  22. P. Pugnati, F. Rodriguez-Mateos, S. Sanfilippo, R. Schmidt, A. Siemko, F. Sonnemann, "Quench Heater Experiments on the LHC Main Superconducting Magnets", Proceedings of EPAC, Vienna, Austria, 2000.
  23. R. Denz, F. Rodriguez-Mateos, CERN, Geneva, Switzerland, "Detection of resistive transitions in LHC superconducting components", Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, 2001.
  24. N.N. Agapov, V.A. Andreev, ..., E.V. Ivanov, et al., Slow beam extraction from the Nuclotron, Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, pp. 1646-1648.



25. E.V.Ivanov, The Detection's System of Quench of Superconducting Lens of Slow Extraction of Nuclotron, Труды международного совещания «Релятивистская ядерная физика: от сотен МэВ до ТэВ», Болгария, Варна, 10-16 сентября 2001 г., Дубна 2001, стр. 215-225.
26. Агапов Н.Н., Алфеев А.В., ... Иванов Е.В., и др., Ход реализации проекта «Нуклотрон-М» (по итогам сенсов № 37, 38), Сообщения ОИЯИ, Р9-2009-38, Дубна 2009
27. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., «Итоги 39-го сеанса Нуклотрона», Сообщения ОИЯИ, Р9-2009-131, Дубна 2009
28. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., «Итоги 40-го и 41-го сеансов Нуклотрона», Сообщения ОИЯИ, Р9-2010-68, Дубна 2010
29. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., Итоги 42-го и 43-го сеансов Нуклотрона, Сообщения ОИЯИ, Р9-2011-72, Дубна 2011
30. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., «Итоги 44-го и 45-го сеансов Нуклотрона», Сообщения ОИЯИ, Р9-2012-108, Дубна 2012
31. Sidorin, N. Agapov, ..., E. Ivanov, et al., Status of the Nuclotron, proceedings of RuPAC2012, Saint-Petersburg, pp. 117-119,  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/wezch03.pdf>
32. E.Ivanov, A.Sidorin, G.Trubnikov, «The quench detection system for superconducting elements of Nuclotron acceleration complex», proceedings of RuPAC2012, Saint-Petersburg, pp. 605-607,  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/rupac2012/papers/weppd024.pdf>
33. Е.В.Иванов, Г.В.Трубников, А.О.Сидорин, З.И.Смирнова, Система детектирования перехода в нормально-проводящую фазу сверхпроводящих магнитов ускорительного комплекса Нуклотрон, Письма в ЭЧАЯ, 2013, Т 10, №4(181), с. 603-612.
34. Аверичев А.С., Агапов Н.Н., ... Иванов Е.В., и др., «Итоги 46-го и 47-го сеансов Нуклотрона», Сообщения ОИЯИ, Р9-2013-140, Дубна 2013
35. G.Trubnikov, N.Agapov, ..., E. Ivanov, et al., NICA project at JINR, Proceedings of IPAC2013, Shanghai, China, pp. 1343-1345,  
<http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC2013/papers/tupfi009.pdf>
36. Fischer E., Khodzhbagiyani H., Kovalenko A. Full size model magnets for the FAIR SIS100 synchrotron. — IEEE Trans. Appl. Supercond., 2008, v.18, N2, p.260-263.
37. S. Kozub, A. Ageyev, A. Bakay, I. Bogdanov, E. Kashtanov, A. Orlov, V. Pokrovsky, P. Slabodchikov, P. Shcherbakov, L. Shirshov, M. Stolyarov, V. Sytnik, L. Tkachenko,

- S. Zinchenko, "Production of superconducting magnets and cryogenic systems at IHEP",  
Proceedings of RUPAC2012, Saint-Petersburg, Russia, 2012
38. Е.В.Иванов, Л.А.Светов, З.И.Смирнова, Датчик перехода в нормально-проводящую  
фазу сверхпроводящих элементов ускорительного комплекса NICA, Письма в  
ЭЧАЯ, 2014, Т.11, №4(188).с. 753-759